

Pedro Jorge Rita Ledo Inácio

Evolução da temperatura ambiente em construções sujeitas ao fogo

Lisboa
2011

“Evolução da Temperatura Ambiente em Construções Sujeitas ao Fogo”

Copyright ©2011 de Pedro Inácio, FCT/UNL, UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



Pedro Jorge Rita Ledo Inácio
Licenciado em Engenharia Civil

EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE EM CONSTRUÇÕES SUJEITAS AO FOGO

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: João Carlos Rocha de Almeida, Prof.
Associado da FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Daniel Aelenei
Arguente: Prof. Doutor João Viegas



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Abril 2011

Agradecimentos

Ao professor João Rocha de Almeida, pelo seu apoio, a sua amizade, a forma sensata como cultivou os seus ensinamentos ao longo de todo o meu percurso académico e pela sua grande ajuda e disponibilidade durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À minha namorada, aos meus pais, ao meu irmão e avós, pelo seu apoio nos momentos mais complicados, agradecendo todo o conforto e calor familiar, tanto no meu percurso pessoal, como académico.

A todos que de forma directa ou indirecta contribuíram para a realização deste trabalho, com especial importância para: Eng.^{os} Pedro Pequito e Paula Morgado, (da empresa LPG), aos quais agradeço a sua amizade e disponibilidade para reforçar os meus conhecimentos na área de sistemas de protecção e extinção contra incêndios por gases e água nebulizada; Eng.^o Carlos Ferreira de Castro (representante da empresa Action Modulers), pela sua disponibilidade e profundo conhecimentos sobre o fenómeno do fogo e segurança contra incêndio; Eng.^o António Leça Coelho (LNEC), pela sua disponibilidade e vastos conhecimentos na segurança contra incêndios em edifícios, que muito contribuíram para o desenvolvimento deste tema; Eng.^o João Carlos Viegas (LNEC), pelo seu apoio, grande interesse, conhecimento do tema e pelas sugestões sensatas que me permitiram clarificar ideias.

À empresa Hidroinstal, L^{da} onde actualmente exerço funções, pois sem a boa vontade dos seus representantes não seria possível conciliar as minhas actuais funções com o tempo que este trabalho consumiu. Agradeço também ao facto da sua principal actividade se tratar de protecção contra incêndio, o que me permitiu absorver alguns conhecimentos que não se adquirem em nenhuma faculdade ou bibliografia e alimentaram o meu gosto por este tema.

A todos os amigos que ganhei ao entrar na FCT/UNL, pelo seu grande apoio e presença durante este percurso académico.

Finalmente, um muito obrigado à FCT/UNL que me formou e preparou para enfrentar o mundo profissional.

Dedicatória

À minha namorada Lucélia, pelo seu apoio incondicional, grande incentivo durante o decorrer deste percurso académico, pela inesgotável paciência nos melhores e piores momentos e pela pessoa que é.

Aos meus pais, Jorge e Salomé, pelo seu apoio incondicional, grande incentivo e esforço durante todo este período académico e pela oportunidade que me deram de o ter concluído. Espero um dia poder retribuir esta enorme dívida que tenho.

Ao meu irmão Filipe, pelo seu grande apoio, recordando com orgulho que o tive um dia como meu caloiro e esperando que o meu exemplo lhe sirva de inspiração para o seu percurso académico.

Resumo

A perda de bens materiais e de vidas humanas em situações de incêndio tem sido ao longo dos tempos uma preocupação crescente, promovendo assim o conceito de segurança contra incêndio e de diversos mecanismos associados à sua prevenção ou limitação dos danos causados.

Um incêndio é algo difícil de prever, assim como a sua consequência nos elementos de construção. Dessa forma, ao longo das últimas décadas, os elementos de construção têm sofrido um processo de desenvolvimento e sido alvo de diversos ensaios a fim de avaliar os seus comportamentos quando solicitados em situação de incêndio. Esses ensaios são ainda hoje realizados em laboratório com base em normas de curvas de aquecimento padronizadas.

Neste trabalho procede-se à análise das curvas nominais, nomeadamente a curva de incêndio padrão e curvas paramétricas condicionadas pelas condições de ventilação, densidade térmica e geometria do compartimento. Essas curvas são comparadas com diversos modelos de simulação computacional (realizados com recurso ao programa de modelos globais CFAST) que permitem simular um incêndio real no interior de um compartimento.

A abordagem adoptada pretende contribuir para a sensibilização do problema que é a segurança contra incêndio, podendo servir de inspiração para que sejam realizados estudos futuros nesta área.

Palavras-chave

Segurança contra incêndio, comportamento do fogo, temperatura em situação de incêndio, curvas de incêndio, simulação computacional.

VARIATION OF TEMPERATURE IN BUILDINGS SUBJECT TO FIRE

Abstract

The loss of material resources and human lives in case of fire has been over time a growing concern, thus promoting the concept of fire safety and various mechanisms associated with damage prevention and mitigation.

A fire is difficult to predict, as well as its effect on the elements of construction. Therefore, over the past decades, the building components have undergone a process of development and been subjected to various tests to evaluate their behaviour in case of fire. These tests are still performed in the laboratory, based on standard heating curves.

This work focuses on the analysis of nominal curves, including the standard fire curve and parametric curves constrained by the conditions of ventilation, heat density and geometry of the room. These curves are compared with several computer simulation models (using the program of global models CFAST), which allow to simulate a real fire inside a compartment.

The approach followed herein also aims to raise awareness of the problems related to safety against fire and may serve as an inspiration for further studies in this topic.

Keywords

Fire safety, fire behavior, temperature in a fire situation, fire curves, computational simulation.

Índice de texto

Agradecimentos.....	I
Dedicatória	III
Resumo.....	V
Abstract	VI
Índice de figuras	XIII
Índice de tabelas	XIV
Índice de gráficos	XV
Lista de símbolos.....	XVII
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e objectivos	1
1.2. Organização de texto.....	4
2. Fogo	5
2.1. O Fenómeno fogo.....	5
2.2. Tipos de combustão.....	7
2.2.1. Combustão lenta.....	8
2.2.2. Combustão viva.....	9
2.2.2.1. Chama	9
2.2.2.2. Incandescência	9
2.2.2.3. Combustão muito viva	10
2.2.3. Explosão	10
2.3. Processos de combustão.....	10
2.3.1. Combustão de sólidos.....	11
2.3.2. Combustão de líquidos	11
2.3.3. Combustão de gases	12
2.4. Produtos resultantes da combustão	13
2.4.1. Calor	13

2.4.2. Chama.....	13
2.4.3. Fumos	14
2.4.4. Gases	14
2.4.4.1. Monóxido de carbono	15
2.4.4.2. Dióxido de carbono.....	15
2.4.4.3. Ácido sulfídrico gasoso.....	16
2.4.4.4. Ácido clorídrico	16
2.4.4.5. Ácido cianídrico.....	17
2.4.5. Produtos não voláteis	18
2.4.6. Vapor de água.....	18
2.5. Temperaturas características	18
2.5.1. Temperatura de inflamação	19
2.5.2. Temperatura de combustão.....	19
2.5.3. Temperatura de ignição	19
2.6. Propagação de calor	20
2.6.1. Condução.....	21
2.6.2. Convecção	22
2.6.3. Radiação	22
3. Desenvolvimento e propagação de um incêndio	25
3.1. Condições de inicio de incêndio	25
3.2. Propagação de incêndio.....	26
3.2.1. Fase inicial.....	27
3.2.2. Fase crescente.....	27
3.2.3. Fase de inflamação generalizada.....	29
3.2.4. Fase de combustão contínua.....	29
3.2.5. Fase de declínio.....	30
3.3. Propagação de um fogo interior de um edifício	31
3.3.1. Propagação de incêndio em comunicações horizontais comuns.....	33
3.3.2. Propagação de incêndio por espaços de difícil acesso	33
3.3.3. Carga de incêndio de um compartimento.....	34
3.4. Propagação de incêndio pelo exterior do edifício	35
3.4.1. Propagação de incêndio em coberturas	35
3.4.2. Propagação de incêndio a edifícios adjacentes	36

3.4.3. Propagação de incêndio através de elementos exteriores.....	37
4. Classificação do comportamento ao fogo de elementos e produtos de construção	39
4.1. Reacção ao fogo dos materiais de construção.....	40
4.2. Resistência ao fogo dos elementos de construção.....	43
5. Controlo da propagação de incêndio	45
5.1. Mecanismos de controlo e extinção	46
5.1.1. Arrefecimento.....	47
5.1.2. Carência ou diluição.....	47
5.1.3. Abafamento e asfixia.....	48
5.1.4. Corte da reacção em cadeia.....	49
5.2. Classificação de fogos e escolha de agentes extintores	49
5.3. Agentes extintores.....	50
5.3.1. Água	51
5.3.1.1. Mecanismos de extinção por água	52
5.3.2. Espumas	53
5.3.2.1. Mecanismos de extinção por espuma.....	54
5.3.3. Pós químicos	54
5.3.3.1. Mecanismos de extinção por pó químico.....	54
5.3.4. Gases inertes.....	55
5.3.4.1. Mecanismos de extinção por gases inertes	55
5.3.5. Halon e substitutos de componentes halogenados	56
5.3.5.1. Mecanismos de extinção por produtos substitutos de componentes halogenados.....	57
6. Curvas de incêndio	59
6.1. Curvas de incêndio nominais	60
6.1.1. Curva de incêndio padrão.....	61
6.1.2. Curva de incêndio para incêndios de aquecimento lento	63
6.1.3. Curva de incêndio para elementos exteriores.....	65
6.1.4. Curva de incêndio de hidrocarbonetos	66

6.1.5. Comparação das curvas nominais	67
6.2. Curvas de incêndio paramétricas.....	68
6.2.1. Fase de aquecimento	70
6.2.2. Fase de arrefecimento.....	75
6.2.3. Densidade de carga de incêndio	77
6.2.4. Exemplos de curvas paramétricas	83
6.2.4.1. Curvas paramétricas com variação dos factores de aberturas.....	83
6.2.4.2. Curvas paramétricas com variação dos valores de cálculo da densidade de carga de incêndio.....	84
6.3. Outras propostas de análise	86
6.4. Simulação computacional.....	87
7. Análise de simulação computacional	89
7.1. Modelo de cálculo	89
7.2. Modelação com CFAST.....	91
7.3. Condições de abertura	93
7.3.1. Modelo de aberturas 1	94
7.3.2. Modelo de aberturas 2	96
7.3.3. Modelo de aberturas 3	99
7.3.4. Modelo de aberturas 4.....	101
7.3.5. Modelo de aberturas 5	104
7.3.6. Modelo de aberturas 6.....	106
8. Comparação de curvas.....	109
8.1. Modelo de aberturas 1	110
8.1.1. Curva paramétrica	110
8.1.2. Comparação de curvas.....	114
8.2. Modelo de aberturas 2	114
8.2.1. Curva paramétrica	115
8.2.2. Comparação de curvas.....	117
8.3. Modelo de aberturas 3	118
8.3.1. Curva paramétrica	119
8.3.2. Comparação de curvas.....	121
8.4. Modelo de aberturas 4.....	122

8.4.1. Curva paramétrica	122
8.4.2. Comparação de curvas.....	125
8.5. Modelo de aberturas 5	125
8.5.1. Curva paramétrica	126
8.5.2. Comparação de curvas.....	128
9. Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	131
10. Bibliografia.....	133

Índice de figuras

Figura 2.1 – Triângulo do fogo	6
Figura 2.2 – Tetraedro do fogo.....	7
Figura 2.3 – Diferentes processos de transmissão de calor	21
Figura 3.1 – Fases de desenvolvimento de um incêndio	25
Figura 6.1 – Modelo de diferenciação de temperatura num compartimento na ocorrência de um incêndio	59
Figura 6.2 – Comparação de curvas de incêndios naturais e curva ISO 834	61
Figura 6.3 – Modelo de aberturas verticais num compartimento.....	71
Figura 7.1 – Planta de habitação unifamiliar onde decorre o incêndio	90
Figura 7.2 – Vista superior do modelo CFAST.....	91
Figura 7.3 – Vista em perspectiva do modelo de CFAST	92
Figura 7.4 – Modelo de aberturas 1.....	94
Figura 7.5 – Modelo de aberturas 1 – cálculo numérico	95
Figura 7.6 – Modelo de aberturas 2.....	97
Figura 7.7 – Modelo de aberturas 2 – cálculo numérico	98
Figura 7.8 – Modelo de aberturas 3.....	99
Figura 7.9 – Modelo de aberturas 3 – cálculo numérico	100
Figura 7.10 – Modelo de aberturas 4.....	102

Figura 7.11 – Modelo de aberturas 4 – cálculo numérico	103
Figura 7.12 – Modelo de aberturas 5.....	104
Figura 7.13 – Modelo de aberturas 5 – cálculo numérico	105
Figura 7.14 – Modelo de aberturas 6, com sequência de variação de aberturas	106

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Efeitos do monóxido de carbono em função da concentração e da duração de exposição.....	15
Tabela 2.2 – Efeitos do dióxido de carbono em função da concentração e da duração de exposição	16
Tabela 2.3 – Efeitos do ácido sulfídrico gasoso em função da concentração e da duração de exposição.....	16
Tabela 2.4 – Efeitos do ácido clorídrico em função da concentração e da duração de exposição.....	17
Tabela 2.5 – Efeitos do ácido cianídrico em função da concentração e da duração de exposição.....	17
Tabela 2.6 – Temperatura de inflamação, temperatura de combustão e temperatura de ignição	20
Tabela 5.1 – Classe de fogos e agentes extintores	50
Tabela 6.1 – Tempo limite para a velocidade de propagação do incêndio.....	74
Tabela 6.2 – Velocidade de propagação do incêndio para diferentes ocupações do compartimento de incêndio	74
Tabela 6.3 – factor δ_{q1}	78
Tabela 6.4 – factor δ_{q2}	78
Tabela 6.5 – factor δ_{ni} em função das medidas activas de segurança contra incêndios ..	79
Tabela 6.6 – valores característicos de densidade de carga de incêndio por tipo de ocupação.....	80
Tabela 6.7 – poder calorífico efectivo H_u de materiais combustíveis para cálculo das cargas de incêndio	82
Tabela 7.1 – Áreas de pavimento e aberturas em cada compartimento	90

Tabela 7.2 – Carga térmica por cada compartimento.....	92
Tabela 7.3 – Revestimento de cada compartimento.....	93
Tabela 8.1 – Área de pavimentos e de aberturas exteriores do modelo 1	110
Tabela 8.2 – Tabela de materiais no compartimento.....	111
Tabela 8.3 – Área de pavimentos e de aberturas exteriores do modelo 2	115
Tabela 8.4 – Área de pavimentos e de aberturas exteriores do modelo 3	118
Tabela 8.5 – Área de pavimentos e de aberturas exteriores do modelo 4	122
Tabela 8.6 – Área de pavimentos e de aberturas exteriores do modelo 5	126

Índice de gráficos

Gráfico 6.1 – Exemplo de curva de incêndio natural	60
Gráfico 6.2 – Curva de incêndio padrão (ISO 834)	62
Gráfico 6.3 – Curva de incêndio para incêndios de “aquecimento lento”	64
Gráfico 6.4 – Comparação de incêndios padrão com curvas de incêndio de aquecimento lento.....	65
Gráfico 6.5 – Curva de incêndio para elementos exteriores.....	66
Gráfico 6.6 – Curva de incêndio de hidrocarbonetos	67
Gráfico 6.7 – Comparação da evolução de temperatura das curvas nominais	68
Gráfico 6.8 – Exemplo da evolução de temperatura de uma curva paramétrica.....	69
Gráfico 6.9 – Evolução de temperatura - tempo, variando o factor de abertura	84
Gráfico 6.10 – Evolução de temperatura – tempo, variando a densidade de carga de incêndio.....	85
Gráfico 7.1 – Evolução da temperatura no modelo de aberturas 1	96
Gráfico 7.2 - Evolução da temperatura no modelo de aberturas 2	98
Gráfico 7.3 - Evolução da temperatura no modelo de aberturas 3	101
Gráfico 7.4 - Evolução da temperatura no modelo de aberturas 4	103
Gráfico 7.5 - Evolução da temperatura no modelo de aberturas 5	105

Lista de símbolos

θ_g	Temperatura dos gases [°C]
θ_{max}	Temperatura máxima dos gases [°C]
$\dot{\theta}_g$	Velocidade de arrefecimento [°C/h]
t	Tempo [m]
t_{max}	Tempo máximo de aquecimento [h]
t_{lim}	Tempo limite de aquecimento [h]
t_{arref}	Tempo de arrefecimento [h]
t^*	Tempo fictício [h]
t^*_{max}	Tempo fictício máximo de aquecimento [h]
T_0	Temperatura ambiente (usualmente 20 °C) [°C]
Γ	Coeficiente de expansão
Γ_{lim}	Coeficiente de expansão limite
ρ	Massa específica da envolvente do compartimento [kg/m ³]
c	Calor específico da envolvente do compartimento [J/kg.K]
λ	Condutividade térmica da envolvente do compartimento [W/m.K]
O	Factor de abertura [m ^{1/2}]
O_{lim}	Factor de aberturas limite [m ^{1/2}]
A_v	Área total das aberturas verticais [m ²]
A_f	Área total de pavimento [m ²]
A_t	Área total da superfície envolvente do compartimento [m ²]
h_{eq}	Média pesada da altura das aberturas verticais [m]
b	Inércia térmica da envolvente [J/m ² .s ^{1/2} .K]

s_i	Espessura da camada i [m]
s_{lim}	Espessura limite [m]
$q_{f,d}$	Densidade de carga térmica [MJ/m^2]
$q_{t,d}$	Valor de cálculo de densidade de carga térmica [MJ/m^2]
$q_{f,k}$	Valor característico da densidade de carga de incêndio por área de pavimento [MJ/m^2]
$Q_{f,i,k}$	Valor característico da carga de incêndio [MJ]
m	Factor de combustão
δ_{q1}	Factor parcial que relaciona o risco de activação de incêndio com as dimensões do compartimento
δ_{q2}	Factor parcial que relaciona o risco de activação de incêndio com o tipo de ocupação do compartimento
δ_n	Factor parcial que relaciona as diferentes medidas activas de segurança contra incêndio
δ_{ni}	Factor parcial que relaciona cada uma das medidas activas de segurança contra incêndio
$M_{k,i}$	Massa do material combustível [kg]
H_{ui}	Valor calorífico efectivo [MJ/kg]
ψ_i	Factor opcional para avaliar cargas de incêndio protegidas
H_u	Poder calorífico efectivo [MJ/kg]
H_{u0}	Poder calorífico efectivo dos materiais secos [MJ/kg]
u	Teor de humidade, em percentagem de peso seco [%]

1. Introdução

“Um incêndio, é um fogo não controlado”

(autor desconhecido)

1.1. Enquadramento e objectivos

A ocorrência de um incêndio, a sua dimensão e os danos que lhe estão associados, são imprevisíveis. Os danos resultantes de um incêndio num edifício, podem ser de variadas ordens, resultando frequentemente na perda de avultados bens materiais e mesmo de vidas humanas. As consequências dos incêndios reflectem-se em prejuízos anuais na economia de cada país que podem atingir muitos milhões de euros [8].

Assim, a segurança contra incêndios foi ganhando crescente importância no seio das sociedades. Desenvolveu-se pois um conjunto de acções destinadas a identificar, avaliar e eliminar os riscos inerentes a um incêndio, com o objectivo de salvaguardar vidas humanas e proteger os bens materiais.

Ao longo dos tempos, as autoridades nacionais não tomaram grandes medidas para fazer face a este problema [13]. Contudo, talvez por influência do grande incêndio dos Armazéns do Chiado na Baixa de Lisboa em 1988 [1], verificou-se nos últimos anos um “despertar” para este assunto, tendo-se dado passos significativos no sentido de introduzir no país um conjunto de procedimentos e de regulamentação adequada sobre segurança contra incêndios em edifícios.

Obviamente, o desenvolvimento de uma metodologia de segurança contra incêndios exige um profundo trabalho de análise e de síntese do conhecimento científico e tecnológico adquirido ao longo dos tempos neste domínio. Assim, foram criadas várias organizações, nacionais e internacionais, com o objectivo de elaborar regulamentos e normas técnicas para aplicar na construção. Em Portugal, tais organizações são, nomeadamente: Autoridade Nacional de Protecção Civil, Ordem dos Engenheiros, Ordem do Arquitectos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Associação Nacional dos Engenheiros Técnicos, entre outras [10].

Especial atenção tem sido dedicada à adopção de medidas preventivas, as quais, apesar de não eliminarem totalmente os riscos associados a um incêndio, permitem evitar/minimizar eventuais situações trágicas de perdas de bens materiais e principalmente de vidas humanas. Por outro lado, verifica-se uma tendência no sentido de assegurar maior segurança e qualidade na construção, o que se reflecte na execução mais rigorosa de projectos de edifícios e em benefícios óbvios para a qualidade de vida dos seus ocupantes.

Contudo, apesar dos muitos esforços já realizados, a segurança contra incêndios não está ainda suficientemente desenvolvida, sendo mesmo, de entre os vários ramos de engenharia ligados à construção, uma das áreas em que o conhecimento científico ainda não se encontra devidamente consolidado. Em todo o caso, já é notória a preocupação em construir edifícios de forma a que, na ocorrência de um incêndio, seja possível:

- § Limitar a produção e propagação de fogo e fumo no interior dos edifícios;
- § Limitar a propagação do incêndio para as construções adjacentes;
- § Permitir que os ocupantes do edifício o evacuem ou sejam salvos pelas equipas de intervenção;
- § Permitir o “normal” procedimento das equipas de intervenção em caso de incêndio, em condições de segurança;
- § Pré-determinar o período de tempo para o qual se encontre garantida a capacidade resistente do edifício em caso de incêndio, permitindo a evacuação e o salvamento dos ocupantes do edifício antes do fim desse período.

Uma vez que um dos principais motores da economia de um país é o sector da construção e esta, por via da concorrência a nível nacional e internacional, tem tendência a diminuir os seus custos, interessa conciliar esta pressão para racionalização de recursos com as exigências motivadas pela segurança contra incêndios. Importa também quantificar adequadamente o comportamento ao fogo dos diferentes materiais estruturais. Por exemplo, comparativamente ao betão armado o aço apresenta um desempenho drasticamente mais reduzido das suas propriedades mecânicas quando solicitado a altas temperaturas.

Desta forma, o conhecimento da evolução da temperatura no interior de um edifício durante a ocorrência de um incêndio torna-se um factor de extrema importância.

Atendendo às dificuldades e aos custos associados ao estudo experimental deste problema, torna-se pois necessário quantificar o incêndio de forma matemática a simular um incêndio natural.

Para tal, foram elaboradas expressões analíticas para curvas de incêndios nominais, para o incêndio padrão (ISO 834), curvas de incêndio para elementos exteriores e curvas de incêndio de hidrocarbonetos [1, 2]. Contudo estas curvas são curvas genéricas, definidas por fórmulas simples e que não variam com o edifício, não dependendo das suas dimensões, do tipo de edifício, da quantidade de ventilação ou da densidade de carga de incêndio.

Existindo a necessidade de aprofundar o conhecimento da evolução da temperatura ambiente no interior do edifício provocada pelo fogo, os parâmetros que a influenciam começam a ser considerados como variáveis. Desta forma, foram elaboradas expressões analíticas para curvas paramétricas. Tais curvas que têm em conta os diversos factores que condicionam a temperatura num dado compartimento, modelando pois a evolução do incêndio de forma mais realista.

1.2. Organização de texto

O presente trabalho está organizado em torno de dois núcleos principais, sendo eles a descrição do fenómeno do fogo e a análise desse mesmo fenómeno no interior de um compartimento.

O primeiro núcleo, apresentado do capítulo 2 ao capítulo 5, tem como objectivo resumir o estado actual do conhecimento sobre o fogo, o seu desenvolvimento, a sua propagação e o seu controlo em edifícios, tendo sempre em conta os materiais de construção no interior do edifício que contribuem para um incêndio.

O segundo núcleo, apresentado do capítulo 6 ao capítulo 8, tem como objectivo analisar as curvas nominais e paramétricas que descrevem o fenómeno do incêndio no interior de um compartimento, comparando ainda essas curvas com dados de evoluções de temperatura com recurso a modelos de simulação computacional.

2. Fogo

A protecção contra incêndios em edifícios é um factor de elevada importância na elaboração de projectos de edifícios, pelo que deve ser sempre tida em conta durante a elaboração desses projectos. Para tal, é necessário conhecer e compreender o fenómeno do fogo, assim como as suas principais características, para que numa situação de incêndio se possam considerar adequadamente todos os factores que influenciam o comportamento da estrutura e assim aplicar devidamente os princípios de segurança e dimensionamento estrutural.

2.1. O Fenómeno fogo

O fogo é uma reacção química entre um combustível e um comburente, a qual é denominada reacção de combustão. Esta reacção química é caracterizada por ser uma reacção exotérmica de onde deriva uma intensa libertação de calor, em geral manifestado por chamas, emissão de fumos e variados gases, entre os quais vapor de água e dióxido de carbono.

A reacção de combustão, uma das mais elementares reacções de oxidação-redução, exige a presença de um combustível combinado com um comburente. Tal reacção resulta numa oxidação rápida do combustível, levando a uma libertação de calor, à sua pirólise e sucessiva alteração da sua composição química.

O combustível pode ser qualquer substância que, na presença de um comburente, seja susceptível de dar início e alimentar uma combustão. De um modo geral, um combustível pode ser qualquer substância que tenha hidrogénio e carbono como estrutura molecular principal, podendo ser natural ou sintética e apresentar-se no estado sólido, líquido ou gasoso.

O comburente pode ser qualquer substância oxidante, sendo o oxigénio presente na atmosfera o comburente mais frequente. A atmosfera, tendo uma percentagem normal de cerca de 21% de oxigénio, constitui geralmente o ambiente propício para servir de comburente na combustão. Contudo, em espaços fechados, como na maioria dos edifícios, um incêndio pode consumir parte desse oxigénio e, caso a sua concentração

na atmosfera desça abaixo dos 15%, o incêndio pode extinguir-se por não existirem as condições ideais para a produção de chama. Ainda assim, caso o incêndio não se apresente realmente extinto, a simples quebra de um envidraçado desse edifício por efeito da temperatura no seu interior pode aumentar subitamente a concentração de oxigénio no seu interior e assim favorecer as condições ideais para o reacendimento de chama. De qualquer modo, a produção de chama não é a única forma de combustão: podem ocorrer situações denominadas como brasa, caracterizada por não produzir chama e ocorrer em concentrações de oxigénio abaixo de 0,4%.

Apesar de a atmosfera conter oxigénio em proporções ideais para alimentar uma combustão, logo contendo um comburente e estando este na maioria das situações em contacto permanente com materiais combustíveis, a combustão não ocorre de forma espontânea. Os elementos químicos carbono e hidrogénio (combustível), na presença de oxigénio (comburente) não são suficientes para desencadear esta reacção química de oxidação-redução. É necessária a presença de uma outra condição, a energia de activação, formando-se assim o denominado triângulo do fogo (figura 2.1) [7,8].

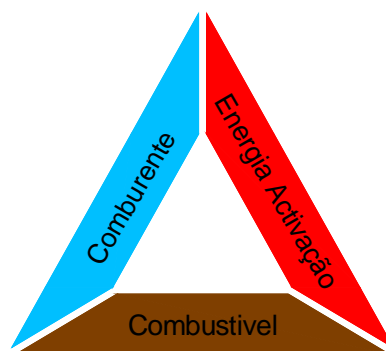


Figura 2.1 – Triângulo do fogo.

A energia de activação não é mais do que a energia necessária fornecer ao combustível de forma a elevar a sua temperatura até que seja atingida a temperatura de ignição e consequentemente a combustão. A energia de activação pode ser de vários tipos, dependendo do material combustível, tendo origem num aquecimento por aproximação de chama, faísca, aumento de temperatura por fricção e choque, ou mesmo por contacto com superfícies quentes.

Contudo, o fenómeno do fogo é bastante complexo. Como tal, o conceito de triângulo do fogo deve ser apenas interpretado como uma descrição simplificada das condições necessárias para que se inicie a combustão.

Logo após o início da combustão, a energia de activação deixa de ser necessária para a continuidade deste processo, uma vez que a chama produzida pela combustão a substitui. Contudo essa substituição vai dar origem a reacções em cadeia, garantindo assim a auto-sustentação da combustão. Desta forma o conceito de triângulo do fogo evolui, dando lugar ao denominado tetraedro do fogo (figura 2.2) [6,8].

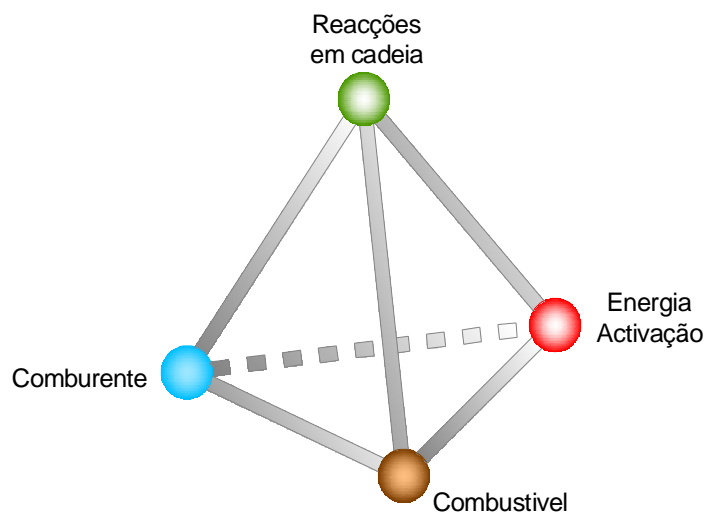


Figura 2.2 – Tetraedro do fogo.

2.2. Tipos de combustão

O comburente condiciona o tipo de combustão, definindo se esta é completa ou incompleta. Caso a concentração de oxigénio seja suficiente para que ocorra o consumo total do combustível, então a reacção de combustão é denominada como combustão completa, sendo libertada a quantidade máxima de calor e produtos resultantes [6].

É denominada combustão incompleta toda a combustão em que, apesar de uma concentração excessiva de oxigénio, ou até por carência do mesmo, o combustível não é consumido na sua totalidade, daí resultando a existência de combustível e produtos

combustíveis resultantes ainda por consumir. Quando é consumido todo o combustível, a combustão é denominada de completa.

A combustão pode desenvolver-se a velocidades distintas, dependendo de várias condições, com especial atenção para as características dos combustíveis envolvidos, o seu grau de inflamabilidade e também o comburente disponível. As combustões são classificadas de acordo com a sua velocidade de propagação segundo as seguintes categorias:

- Lentas;
- Vivas;
- Explosões.

A referida classificação é uma forma de classificar as combustões de uma forma simples, de acordo com parâmetros facilmente identificáveis, como a temperatura emitida, a velocidade de propagação das chamas no combustível, a energia emitida pela radiação e a pressão exercida pelos gases resultante da combustão.

Adopta-se a temperatura de 500 °C a referência para distinguir as combustões como lentas ou vivas; para a velocidade de propagação das chamas toma-se a velocidade de propagação do som no ar (340 m.s^{-1}) como referência para distinguir as chamas muito vivas das explosões [8].

2.2.1. Combustão lenta

Para combustões onde tanto o combustível como os produtos resultantes atingem valores de temperatura inferiores a 500 °C, a combustão é considerada como lenta, sendo caracterizada por, durante todo o processo, nem sempre existir produção de chama ou fumos.

A combustão espontânea é o resultado de uma combustão lenta que se desenvolve num espaço onde seja dificultada a dissipação de energia. Por exemplo, em locais utilizados para armazenamento de palha, caso se desenvolvam reacções exotérmicas e estas não sejam possíveis de dissipar para o ambiente exterior, a acumulação de energia é definida

como sendo uma combustão lenta. Se esta acumulação de energia atingir uma quantidade suficiente, pode dar origem à ignição da totalidade do material combustível.

A combustão lenta pode não produzir chama, sendo um exemplo corrente a oxidação do ferro, formando a ferrugem quando este é exposto a uma atmosfera húmida.

2.2.2. Combustão viva

Uma combustão onde sejam atingidas temperaturas superiores a 500 °C é denominada de combustão viva, sendo caracterizada por chama e emissões de fumos mais ou menos opacos. Neste tipo de combustão, importa referir as seguintes características [6]:

- Chama;
- Incandescência;
- Combustão muito viva;

2.2.2.1. Chama

A chama é a combustão da mistura de comburente com os gases combustíveis e partículas de carbono. A intensidade da chama, assim como a intensidade de temperatura irradiada é dependente da quantidade de ar (oxigénio) que intervêm no processo de alimentação da chama.

2.2.2.2. Incandescência

No caso de combustíveis sólidos, onde a combustão decorre à superfície, a incandescência encontra-se na sua zona da sua ignição, caso estes sejam metais, pode verificar-se a incandescência do combustível. Para combustíveis sólidos orgânicos, como no caso da madeira, é possível verificar-se a formação de brasas quando o material durante a combustão não liberta gases em quantidade suficiente para a formação de chama.

2.2.2.3. Combustão muito viva

Quando a combustão deflagra de forma quase instantânea em todo o volume e em frações de segundo, mas ainda assim a uma velocidade de propagação inferior à velocidade de propagação do som no ar (340 m.s^{-1}), é denominada de combustão muito viva. Este é um tipo de combustão frequente em edifícios em que o espaço é suficientemente ventilado.

2.2.3. Explosão

A combustão explosiva é assim designada quando a sua velocidade de propagação é superior à velocidade de propagação do som no ar. Este processo é bastante raro e apenas ocorre se a combustão for resultado de partículas de material combustíveis com uma granulometria muito fina ou de uma mistura de gases com uma concentração de oxigénio tal que se forme uma mistura muito inflamável. Outro processo de combustão explosiva pode ocorrer num incêndio num edifício pouco ventilado, onde se acumulem gases inflamáveis em concentrações muito significativas ou produtos resultantes da combustão ainda mal consumidos e muito ricos em partículas com carbono, gerando elevadas temperaturas que podem estilhaçar os envidraçados do edifício, permitindo uma entrada súbita de ar no seu interior. Ambas as situações podem dar origem a uma súbita deflagração dos gases no interior do edifício e originar uma explosão que provoca um aumento brusco de temperatura e pressão atmosférica. Este caso específico de combustão é denominado de explosão de fumo (em inglês, *backdraft*) [8].

2.3. Processos de combustão

Os materiais combustíveis podem ser encontrados em diversos tipos de substâncias, existindo estas em diferentes estados físicos. Assim o combustível pode encontrar-se no estado sólido, líquido e gasoso, apresentando-se numa das seguintes formas:

- Estado sólido, como no caso da madeira, produtos plásticos e outros derivados do petróleo;

- Estado líquido, como no caso dos álcoois, benzenos, acetonas, diluentes e combustíveis fósseis derivados do petróleo;
- Estado gasoso, como no caso do metano, butano e hidrogénio.

2.3.1. Combustão de sólidos

Os combustíveis no estado sólidos apresentam uma elevada coesão molecular. Assim, é necessário um acentuado processo de decomposição que permita a ocorrência da reacção de combustão. A combustão de um material sólido pode ocorrer de duas formas, por brasa ou por pirólise:

- Por brasa, ocorrendo a combustão com ausência de chama ou chama pouco significativa, mas existindo contudo uma elevada emissão de radiação.
- Por pirólise, onde o combustível é solicitado por uma fonte de calor que provoca uma decomposição a nível molecular, levando à libertação de gases inflamáveis pelo material combustível e à ocorrência da combustão com chama.

A combustão de sólidos pode ocorrer em duas fases distintas, na presença da fonte de calor ou de forma auto-sustentável. Quando a fonte de calor é retirada do material combustível mas este, apesar de aquecido, ainda não atingiu a sua temperatura de combustão, o processo de combustão cessa. Se, durante o período de contacto com a fonte de calor, for atingida a temperatura de combustão, ao ser retirada a fonte de calor as reacções de combustão decorrem de forma auto-sustentável até deixar de existir combustível ou comburente em quantidades suficientes para que a combustão possa prosseguir.

2.3.2. Combustão de líquidos

Os combustíveis no estado líquido apresentam uma coesão molecular mais débil que os combustíveis no estado sólido, possuindo ainda assim coesão suficiente para que a combustão de um líquido não se dê neste estado físico. Esta apenas ocorre após a decomposição do combustível, processo este que origina a libertação de gases voláteis pelo material que sofre a combustão, quando sujeito a uma fonte de calor.

A fonte de calor e a temperatura a que está sujeito o combustível líquido estão intimamente ligados à libertação de vapor, sendo que quanto maior a temperatura do combustível maior é a sua vaporização. A passagem de estado físico de líquido para gasoso está associada a vaporização de gases combustíveis, mas para que ocorra combustão é necessário que o líquido emita vapores voláteis em quantidade suficiente para que a mistura combustível/oxigénio se torne inflamável. Os combustíveis líquidos podem ser de diversos tipos e como tal apresentam características diversas, sendo a vaporização dependente dos pontos de inflamação, combustão e ignição de cada combustível líquido.

2.3.3. Combustão de gases

Os combustíveis no estado gasoso apresentam coesões moleculares nulas ou praticamente nulas. Logo, não têm que sofrer nenhuma decomposição que obrigue à quebra das ligações moleculares, sendo pois facilmente inflamáveis.

Contudo, para que ocorra a combustão de gases inflamáveis, é necessária a presença de alguns factores que possibilitem a sua inflamação. Assim, é necessária uma dada proporção de gás combustível e oxigénio nas percentagens adequadas, certas condições de pressão e de temperatura do espaço envolvente à massa de gás e o fornecimento de uma energia de ignição que na grande maioria dos casos pode ser muito pequena.

A proporção de comburente misturado com o combustível tem um papel importante, uma vez que define os limites para os quais a mistura tem características inflamáveis. O limite inferior das condições inflamáveis corresponde à situação em que a mistura é demasiadamente pobre em combustível. Quanto ao limite superior, corresponde à situação acima da qual a combustão cessa pelo facto da mistura ter carência de comburente.

Em combustíveis no estado gasoso, as variações de temperatura, pressão e percentagem de oxigénio na mistura são condicionantes para a ocorrência da combustão. Estas condições dependem do tipo de gás combustível que compõe a mistura. Um aumento de temperatura e um aumento de pressão, quer em separado quer em conjunto, têm a capacidade de aumentar o domínio de inflamabilidade do gás, enquanto que a diminuição destes dois factores implica uma carência de combustível na mistura,

diminuindo pois o domínio de inflamabilidade do gás. Pode assim concluir-se que a mistura apenas é combustível e a combustão propagável se a proporção oxigénio/combustível se encontrar dentro dos limites de inflamação, tal não ocorrendo para misturas demasiado ricas ou demasiado pobres.

2.4. Produtos resultantes da combustão

A combustão de um material combustível dá geralmente origem a um conjunto de produtos resultantes dessa reacção, tais como calor, chama, fumos e gases resultantes da pirólise. Estando o combustível no estado sólido, a reacção de combustão dá também origem a cinzas, assim como produtos resultantes da combustão [8].

2.4.1. Calor

Sendo a reacção de combustão uma reacção química e exotérmica, nesta reacção dá-se uma elevada libertação de calor, associada a um acentuado aumento de temperatura. Esta variação de temperatura ao aquecer o espaço e os corpos que a rodeiam, é a principal responsável pela propagação do fogo, uma vez que leva a que no espaço envolvente, sejam atingidas as temperaturas características dos materiais também combustíveis, mesmo que estes ainda não tenham sido afectados pela chama, como será referenciado mais adiante.

2.4.2. Chama

O aumento de temperatura provocado pela reacção de combustão proporciona a libertação de gases voláteis do material combustível, Na presença de oxigénio em proporções ideais na mistura, esses gases inflamam e dão origem à chama. Esta, por sua vez é fonte de transferências de energia a outros materiais através da emissão de radiação, propagando assim energia de uma forma multidireccional.

2.4.3. Fumos

Os fumos são particularmente frequentes quando ocorre uma combustão incompleta, sendo a sua produção mais intensa quanto mais incompleta for a combustão. Esta combustão incompleta tem como resultados aerossóis e a suspensão de finas partículas semi-consumidas de carbono mais ou menos opacas que reduzem a visibilidade em locais onde decorre a combustão, dificultando assim a evacuação de um edifício.

Quando o comburente é abundante, o fumo é constituído por partículas finíssimas visíveis, normalmente de cor branca ou acinzentada. Existindo carência de comburente e a temperatura da combustão é bastante elevada, o fumo apresenta uma cor negra, como é o exemplo da combustão de certos materiais plásticos. Contudo, o fumo pode por vezes apresentar outras colorações como amarelo ou violeta, o que é indicador da libertação de gases tóxicos pela combustão.

2.4.4. Gases

Sendo a combustão uma reacção química entre combustível e comburente e sendo mais vulgares as combustões em que o comburente é o ar, então a combustão resulta normalmente na combinação entre oxigénio e carbono, de onde resultam inúmeros gases. Os gases resultantes da combustão são de diversos tipos dependendo principalmente do tipo de combustível e sendo os mais comuns o monóxido de carbono (CO) e o dióxido de carbono (CO₂), podendo contudo ocorrer a formação de outros compostos como o ácido sulfídrico gasoso (H₂S) o ácido clorídrico (HCl) e o ácido cianídrico (HCN).

Estes gases resultantes da combustão são em geral tóxicos, pelo que a sua presença em concentrações elevadas numa atmosfera que tenha de ser respirável pode apresentar um elevado perigo para os ocupantes desse espaço. Na grande maioria das vezes, a mais grave das consequências dos incêndios, a perda de vidas humanas, é consequência directa dos gases de combustão.

2.4.4.1. Monóxido de carbono

O monóxido de carbono (CO) é um gás inodoro e apresenta um comportamento asfixiante, uma vez que, quando inalado, se combina com a hemoglobina, formando a carboxihemoglobina, a qual por sua vez não apresenta características de transporte de oxigénio, impedindo assim as trocas gasosas entre os tecidos do organismo.

O monóxido de carbono apesar de ser um produto resultante ainda não totalmente oxidado apresenta ainda características de combustível, sendo facilmente inflamável para uma vasta gama de concentrações.

Na seguinte tabela são apresentados alguns efeitos deste gás segundo as suas concentrações e tempo de exposição [6],

Concentração de CO (ppm*)	Duração da exposição	Efeitos
50	8 horas	Nenhuns
200	2 horas	Ligeiros
1000	1 hora	Graves (síncope)
10000	1 minuto	Morte rápida

(*) ppm – concentração em partes por milhão (cm^3/m^3).

Tabela 2.1 – Efeitos do monóxido de carbono em função da concentração e da duração de exposição.

2.4.4.2. Dióxido de carbono

O dióxido de carbono (CO_2) é um gás presente na atmosfera e um produto resultante das trocas gasosas do organismo. Contudo, é também um produto resultante de combustões, podendo como resultado as concentrações deste gás ascenderem a valores muito superiores aos valores atmosféricos. Concentrações de dióxido de carbono compreendidas entre 0,5% a 7%, resultam apenas num aumento do ritmo respiratório, mas em concentrações superiores a 10%, mesmo que inalado por poucos minutos, este gás pode ser mortal por provocar a paralisia do sistema respiratório [6].

Na seguinte tabela são apresentados alguns efeitos deste gás segundo as suas concentrações e tempo de exposição,

Concentração de CO ₂ (ppm*)	Duração da exposição	Efeitos
0,5 a 7%	-	Aumento do ritmo respiratório
10 a 12%	Alguns minutos	Morte

(*) ppm – concentração em partes por milhão (cm³/m³).

Tabela 2.2 – Efeitos do dióxido de carbono em função da concentração e da duração de exposição.

2.4.4.3. Ácido sulfídrico gasoso

O ácido sulfídrico gasoso (H₂S), tal como o nome indica, é um gás resultante da combustão de compostos orgânicos com enxofre.

Na seguinte tabela são apresentados alguns efeitos deste gás segundo as suas concentrações e tempo de exposição [8],

Concentração de H ₂ S (ppm*)	Duração da exposição	Efeitos
20	-	Nenhuns
100	1 horas	Ligeiros ou nenhuns
300	30 minutos a 1 hora	Graves
600	30 minutos	Morte
1000	1 minuto	Morte rápida

(*) ppm – concentração em partes por milhão (cm³/m³).

Tabela 2.3 – Efeitos do ácido sulfídrico gasoso em função da concentração e da duração de exposição.

2.4.4.4. Ácido clorídrico

Alguns materiais actualmente utilizados na indústria da construção contem cloro na sua composição, sendo este libertado durante a pirólise na forma de ácido clorídrico (HCl).

Na seguinte tabela são apresentados alguns efeitos deste gás segundo as suas concentrações e tempo de exposição [6],

Concentração de HCl (ppm*)	Duração da exposição	Efeitos
1 a 5	8 horas	Nenhuns
5 a 10	2 horas	Ligeiros
35	1 hora	Graves
10000	1 minuto	Morte rápida

(*) ppm – concentração em partes por milhão (cm^3/m^3).

Tabela 2.4 – Efeitos do ácido clorídrico em função da concentração e da duração de exposição.

2.4.4.5. Ácido cianídrico

Este produto de combustão sendo, um composto com cianeto (HCN), é um gás extremamente perigoso. Este gás é o produto da combustão de lãs, sedas e alguns materiais plásticos.

Na seguinte tabela são apresentados alguns efeitos deste gás segundo as suas concentrações e tempo de exposição [8],

Concentração de HCN (ppm*)	Duração da exposição	Efeitos
15	-	Nenhuns
50 a 60	1 hora	Ligeiros ou nenhuns
100	30 minutos a 1 hora	Graves
150	30 minutos	Morte
180 a 270	1 minuto	Morte rápida

(*) ppm – concentração em partes por milhão (cm^3/m^3).

Tabela 2.5 – Efeitos do ácido cianídrico em função da concentração e da duração de exposição.

2.4.5. Produtos não voláteis

Os produtos não voláteis resultam da transformação de matéria durante a combustão, sendo eles os resíduos no estado sólido como no caso das cinzas, ou líquidos criados em consequência de mecanismos de fusão que ocorrem durante os processos térmicos sofridos por alguns combustíveis sólidos.

As cinzas são o resultado da combustão de matérias combustíveis que contêm na sua composição materiais minerais não combustíveis. Como tal, não sofrem qualquer tipo de decomposição, depositando-se então sob a forma de cinza.

2.4.6. Vapor de água

Sendo o oxigénio o mais usual comburente numa combustão, da sua combinado com um combustível normalmente resulta o vapor de água, que é assim um habitual produto de combustão.

2.5. Temperaturas características

Os materiais combustíveis, tanto no estado sólido como no estado líquido, quando solicitados por uma fonte de calor, aquecem até atingirem uma temperatura a partir da qual começam a libertar gases combustíveis. O patamar de temperatura para o qual ocorre libertação de gases combustíveis varia de material para material, sendo que, na grande maioria dos casos, materiais combustíveis facilmente inflamáveis libertam gases combustíveis à temperatura ambiente.

As temperaturas para as quais ocorre libertação de gases variam de acordo com cada material, podendo-se distinguir três tipos de temperatura: temperatura de inflamação, temperatura de combustão e temperatura de ignição.

2.5.1. Temperatura de inflamação

A temperatura de inflamação é a temperatura mínima acima da qual o combustível liberta vapores voláteis em quantidade suficiente para que, em contacto com o oxigénio, se possa formar uma mistura inflamável que, em contacto com uma fonte de calor externa, dê início ao processo de combustão. Contudo para esta temperatura, quando se retira a fonte de ignição as chamas provocadas pela combustão extinguem-se

As variações de temperatura de inflamação para cada material combustível são apresentadas na tabela 2.6 [6, 8].

2.5.2. Temperatura de combustão

A temperatura de combustão é a temperatura mínima acima da qual o combustível liberta vapores voláteis em quantidade suficiente para que, em contacto com o oxigénio, se forme uma mistura inflamável que, em contacto com uma fonte de calor externa, inicie o processo de combustão e o mantenha mesmo quando retirada a fonte de ignição. Mesmo que a temperatura ambiente baixe, a chama da combustão pode não se extinguir devido à temperatura das reacções em cadeia.

As variações de temperatura de combustão para cada material combustível são apresentadas na tabela 2.6 [6, 8].

2.5.3. Temperatura de ignição

A temperatura de ignição é a temperatura mínima acima da qual o combustível liberta vapores voláteis em quantidade suficiente para que, em contacto com o oxigénio, a mistura entre em combustão espontânea ou auto ignição sem necessidade da presença de qualquer fonte de calor externa.

Tal como para as anteriores temperaturas características, também a tabela 2.6 indica as variações de temperatura de ignição para cada tipo de material combustível [6, 8].

	Temperatura de inflamação [°C]	Temperatura de combustão [°C]	Temperatura de ignição [°C]
Madeira de Pinho	+225	+265	+280
Papel	+230	-	+230
Carvão de madeira	-	-	+250 a +350
Polietileno	+340	-	+350
Poliestireno	+345	-	+490
Gasolina	-46	-	+280
Álcool etílico	+12	-	+425
Acetona	-18	-	+335
Petróleo	+30	+43	+250 a +450
Óleo lubrificante pesado	+221	+264	+400
Propano	-	-	+450
Acetileno	-	-	+305

Tabela 2.6 – Temperatura de inflamação, temperatura de combustão e temperatura de ignição [8].

2.6. Propagação de calor

A propagação de calor é um fenómeno físico que está intimamente ligado aos mecanismos de desenvolvimento de um incêndio. Este fenómeno físico de transferência de energia térmica ocorre por processos de:

- Condução
- Convecção
- Radiação

No interior de um edifício, as transmissões de calor sob a forma de condução decorrem por transferências térmicas entre os elementos construtivos e materiais não combustíveis. Por sua vez, a convecção é originada pela movimentação de gases quentes sobre as superfícies envolventes do edifício, tais como pavimentos, tectos e paredes. A radiação é produzida pelas chamas e fumos sobre elementos visíveis. Na figura 2.3, representam-se estes processos de transmissão de calor [1, 6, 8].

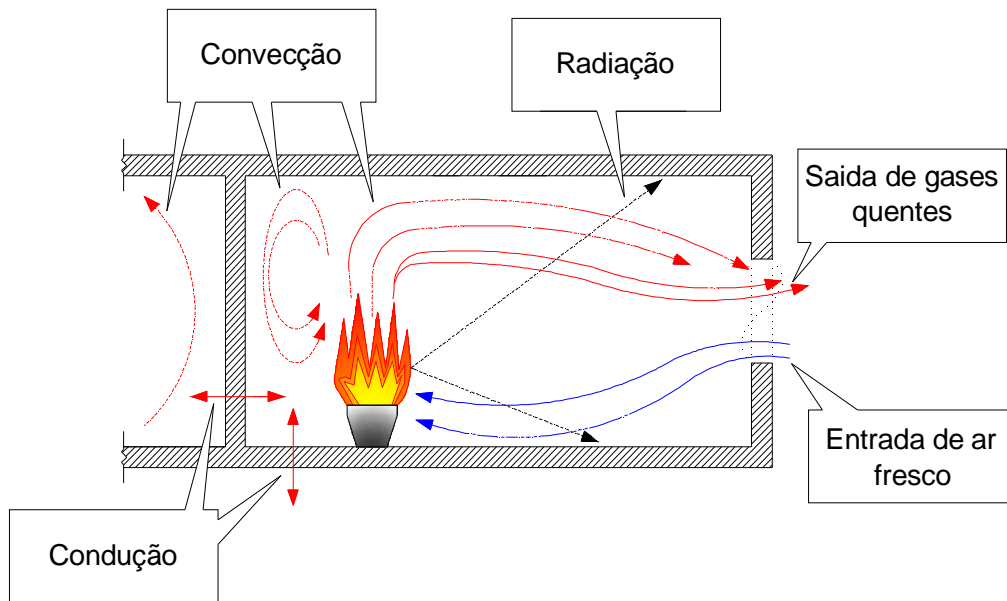


Figura 2.3 – Diferentes processos de transmissão de calor [6].

2.6.1. Condução

A condução é um fenómeno de transferência de calor que se manifesta principalmente em materiais não combustíveis em repouso nos estados sólido e líquido. Este fenómeno pode também ocorrer em materiais combustíveis desde que não sejam atingidas as suas temperaturas características como anteriormente referido.

A transferência de energia por condução decorre da interacção entre partículas, desde que exista contacto entre elas. Esta transferência decorre a nível molecular: as moléculas colidem com as suas vizinhas, transferindo a energia das moléculas mais “quentes” a moléculas com temperaturas mais baixas, logo num estado de excitação mais baixo. A esta transferência de energia de uma fonte mais quente a outra mais fria dá-se o nome de transmissão de calor.

A velocidade de propagação de calor por condução é variável, dependendo do tipo de material, visto que diferentes materiais reagem com diferentes comportamentos mediante a sua condutividade térmica (λ).

2.6.2. Convecção

A propagação de calor por convecção é um mecanismo de transferência de energia que decorre em fluidos (materiais no estado líquido e gasoso). A convecção natural apresenta comportamento diferente da condução, visto que a energia é transferida, não localmente a nível molecular, mas sim devido a diferenças de pressão por variação térmica: a convecção dá origem a um fluxo de calor que resulta em movimentos de partículas a nível macroscópico, quando é feito o transporte de energia de uma região quente para uma região fria.

Quando a convecção resulta de diferenças de pressão provocadas por variações térmicas que obriguem a movimentação do fluido, esta denomina-se convecção natural. Contudo a convecção pode também ser forçada, quando existe movimentação do fluido devido a uma acção externa, normalmente por meios mecânicos.

A convecção num foco de incêndio com existência de chama é consequência do aquecimento de uma massa de ar em torno da chama, forçando à excitação das moléculas, à sua consequente vibração e afastamento interno. Esta vibração vai obrigar a um aumento de volume, que por sua vez vai fazer reduzir a densidade do ar. Dessa forma, a massa de ar menos densa tende a sofrer um movimento de ascensão, ocupando assim o espaço ocupado pelas partículas mais frias. Por sua vez, o volume de fluido mais frio e logo mais denso é forçado a descer, tomando assim o lugar das partículas anteriormente aquecidas.

Quando o fluido antes aquecido volta a arrefecer, o espaço que ocupa passa a ser ocupado por fluido a temperaturas mais elevadas, forçando assim a sua descida. Este processo repete-se continuamente, criando assim um movimento cíclico do fluido com aquecimento e arrefecimento, designado por correntes de convecção.

2.6.3. Radiação

A radiação, ao contrário da condução ou convecção, não necessita de um meio material para que seja realizada a transferência de energia: esta pode transferir-se mesmo num meio isento de matéria como o caso do vácuo, com comportamento e características similares à luz.

Segundo as leis da Termodinâmica, o calor à superfície de um corpo é libertado em forma de radiação electromagnética. Ao atingir um novo corpo receptor, a radiação térmica sofre absorção e reflexão, podendo em corpos transparentes ou translúcidos ocorrer também refacção. A componente da energia resultante da absorção resulta numa transferência de calor entre dois corpos por radiação electromagnética.

A emissão de radiação e absorção de calor num corpo é equilibrada, sendo absorvida a mesma quantidade de radiação emitida desde que o corpo esteja em equilíbrio térmico com a sua vizinhança. Contudo, quando um corpo entra em combustão, a sua temperatura aumenta drasticamente em relação à sua vizinhança, forçando assim a uma emissão de energia radiante superior à absorção da mesma [6].

3. Desenvolvimento e propagação de um incêndio

As condições de desenvolvimento e propagação de incêndios em edifícios, assim como o comportamento dos materiais ao fogo, são áreas em que é necessário aprofundar o conhecimento existente, tendo em vista a elaboração de melhores projectos e uma aplicação mais eficaz das disposições regulamentares de segurança contra incêndio.

3.1. Condições de início de incêndio

Designa-se por incêndio a ocorrência de um fogo não controlado. As suas causas podem ser de diversos tipos, sendo na grande maioria devidas a má utilização de equipamentos ou negligência.

De entre as causas possíveis para o início de um incêndio, as mais frequentes em situações domésticas são:

- Uso inconveniente de aparelhos eléctricos que apresentem anomalias, seja por desgaste ou defeito;
- Sobrecarga em instalações eléctricas provocando sobreaquecimentos na instalação ou até curto-circuito;
- Utilização indevida de fósforos, velas e cigarros.

A nível industrial, as causas mais frequentes de ocorrência de incêndios são:

- Aparelhos com anomalias eléctricas; utilização de aparelhos que durante a sua normal utilização produzam chispas ou projecção de partículas incandescentes;
- Manipulação negligente de produtos químicos inflamáveis;
- Contacto accidental de substâncias químicas que, sendo inofensivas no seu estado elementar, podem formar substancias instáveis quando combinadas com outras e induzir reacções violentas de explosão ou combustões instantâneas (por exemplo, a combinação do peróxido de hidrogénio com alguns metais ou matéria orgânica, devido à sua grande característica de agente oxidante, pode gerar combustão instantânea).

Para que a combustão se inicie, é necessária uma fonte de calor. Esta, por sua vez, deve possuir energia suficiente para aumentar rapidamente a temperatura do material combustível à superfície até ao ponto em que este entre em combustão. Esta fonte de energia que pode assumir várias formas, desde uma faísca, chama ou até material ao rubro, deve estar a uma temperatura da ordem de 600° a 1000°C. Note-se que, apesar desta gama de temperaturas estar muito acima dos pontos de ignição da grande maioria dos materiais existentes num compartimento, o que possibilita a ignição de um material combustível é a quantidade de energia térmica susceptível de ser libertada pela combustão desse material, também denominado de potencial calorífico.

Assim, quando o material combustível é exposto à fonte de calor, a sua superfície aquece significativamente até atingir o ponto onde ocorre a degradação da estrutura molecular (pirólise) por acção do calor, resultando na libertação de gases inflamáveis. Quando existe a presença de comburente e a pirólise do material liberta gases combustíveis, dá-se a formação de uma mistura de combustível e comburente que, em determinada concentração e em contacto com a fonte de calor, inflama. Esta inflamação origina um aumento de temperatura na superfície do material, fazendo com que este também inflame, produzindo chama e calor. Citando Lavoisier, “*Na Natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma*” e a combustão não é excepção, já que esta reacção exotérmica provoca consumo de oxigénio e material combustível, mas produz vapor de água, monóxido de carbono, dióxido de carbono, assim como a formação de diversos produtos resultantes da decomposição do carbono e hidrogénio, quando combinados com o oxigénio [6].

3.2. Propagação de incêndio

O incêndio, desde que deflagra até à sua extinção, passa por várias fases distintas ao longo do seu desenvolvimento natural:

- Ignição, ou deflagração: fase inicial;
- Propagação: fase crescente;
- *Flashover*: fase de inflamação generalizada;
- Incêndio generalizado: fase de combustão continua;
- Fase de declínio.

A figura 3.1 representa graficamente a evolução teórica da temperatura de um incêndio ao longo do tempo.

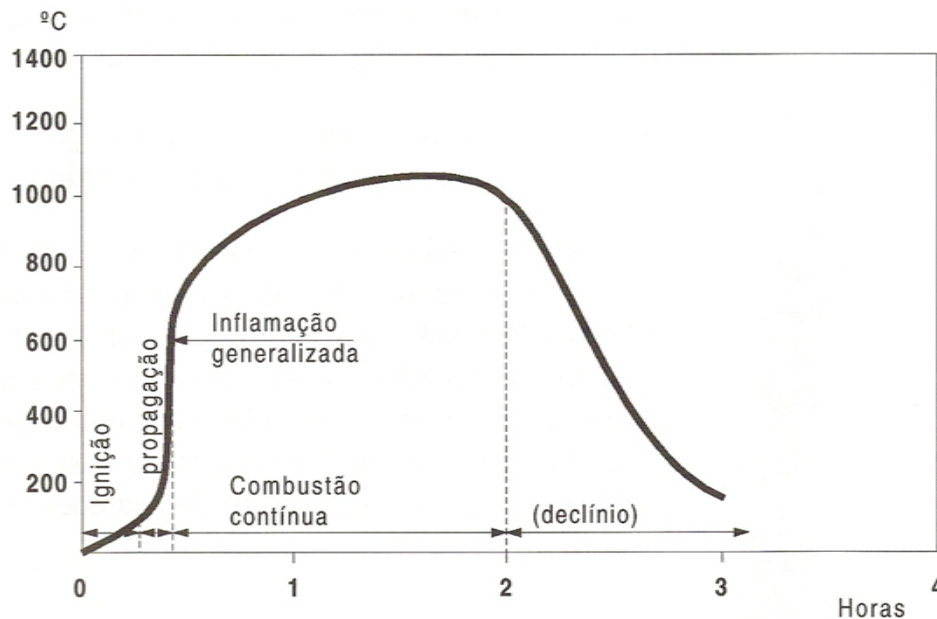


Figura 3.1 – Fases de desenvolvimento de um incêndio [6].

3.2.1. Fase inicial

As condições necessárias para a ignição de um incêndio foram anteriormente mencionadas. Quando um incêndio está na sua fase inicial, geralmente a sua deflagração é feita de forma lenta e não envolve todo o compartimento onde decorre a ignição. O início da deflagração é localizada e de pequenas dimensões, mas caso sejam garantidas as condições favoráveis para a sua propagação, esta rapidamente evolui para um fogo de maiores proporções, sendo o seu crescimento limitado pela quantidade de oxigénio existente e pelo combustível disponível no local de eclosão do fogo.

3.2.2. Fase crescente

Nesta fase do incêndio, a decomposição dos materiais combustíveis provocada pelo aumento de temperatura vai garantindo a libertação de gases que ao inflamarem produzem mais calor. Nesta fase, a dissipação de energia é feita principalmente por convecção e radiação, contribuindo assim para o aquecimento dos materiais

combustíveis adjacentes ao foco inicial e do restante compartimento. Gera-se assim um progressivo aumento de temperatura, com consequente libertação de gases inflamáveis e acréscimo da combustão.

No decorrer de um incêndio, a maior parte do calor produzido é transmitido por convecção, sendo esta provocada pela expansão do ar ao redor da chama. Este, ao ser aquecido, expande, torna-se menos denso que o ar mais frio e ascende. É dessa forma que o ar mais frio é arrastado de modo a alimentar o fogo, formando assim as correntes de convecção que possibilitam o transporte de partículas incandescentes e o rápido aquecimento de todo o compartimento e a propagação do fogo desde a sua origem até pontos mais afastados do mesmo compartimento.

Enquanto o ar ascendente a elevadas temperaturas e os produtos resultantes do fogo aquecem rapidamente os materiais em que contactam, a radiação produzida pela chama aquece também as superfícies dos materiais combustíveis que estão na sua proximidade, facilitando assim a rápida propagação das chamas por efeito de aquecimento das superfícies, libertação de gases combustíveis e consequente inflamação.

Desta forma, o revestimento das paredes tem um papel importante neste fenómeno, pois se o seu material constituinte for inflamável, este quando sujeito ao fogo inflama e entra rapidamente em combustão, propiciando assim um alongamento das chamas que atingem o tecto mais rapidamente e com maior intensidade. As chamas, ao atingirem o tecto, deflectem e progridem na horizontal, emitindo energia por condução ao compartimento superior e irradiando calor descendente para o pavimento, para além de produzirem uma espessa camada de gases quentes.

Se, analogamente ao revestimento de paredes, o tecto estiver revestido com materiais inflamáveis, esses materiais em contacto com as chamas entrarão em combustão, permitindo assim uma rápida progressão das chamas [6].

Durante esta fase do incêndio, com os gases a altas temperaturas acumulados no tecto, a radiação descendente provocada pelo alongamento das chamas e o aquecimento progressivo do compartimento e dos materiais combustíveis em zonas afastadas do foco de origem das chamas propiciam a emissão de gases inflamáveis dos materiais combustíveis e a generalização progressiva das chamas a todo o compartimento.

3.2.3. Fase de inflamação generalizada

A fase de inflamação generalizada, também conhecida na terminologia inglesa por *flashover*, corresponde à situação onde a generalização das chamas leva a que todo o combustível existente no compartimento esteja envolvido no incêndio. Como é possível verificar no gráfico da figura 3.1, o fenómeno de *flashover* [1] ou inflamação generalizada é de curta duração, caracterizando-se por um crescimento exponencial das temperaturas e generalização das chamas a todos os combustíveis do compartimento.

3.2.4. Fase de combustão contínua

A fase de combustão contínua caracteriza-se pelo facto de o incêndio se encontrar completamente desenvolvido com a sua carga de incêndio distribuída em todo o compartimento. Nesta fase, verifica-se um aumento da produção de calor, estando o compartimento sujeito às temperaturas mais elevadas durante todo o processo de incêndio. Dependendo das características do compartimento e do incêndio, tais temperaturas podem ser superiores a 1000 °C, caso o incêndio seja de grandes dimensões e ocorra num ambiente confinado.

Nesta fase, com temperaturas tão elevadas, a decomposição do combustível por pirólise ocorre de forma acelerada, em quantidades muito superiores à concentração de oxigénio existente no compartimento, tornando assim o ar saturado devido ao aumento rápido da concentração de gases a elevadas temperaturas ao qual se associam os produtos da combustão.

Se durante esta fase, o incêndio decorrer num compartimento em ambiente fechado, onde todas as aberturas estejam fechadas, ou mesmo que abertas, sejam de dimensão insuficiente para permitir a renovação de ar para alimentar o incêndio de forma conveniente, considera-se que o incêndio é controlado pela ventilação. Esta ventilação deficiente durante a combustão vai diminuir a concentração de oxigénio e saturar o ar com gases quentes e não comburentes, levando assim a uma combustão incompleta do combustível ou mesmo à extinção do incêndio por asfixia.

A quantidade e dimensão das aberturas de um compartimento é pois um factor do qual depende a agressividade de um incêndio, sendo esta directamente proporcional à

ventilação do compartimento. Contudo, em muitos casos, quando o incêndio se encontra quase extinto por carência de comburente, a simples quebra de um envidraçado devida às altas temperaturas dos gases do compartimento leva a que por essa nova abertura sejam expelidos os gases quentes e combustíveis que em contacto com o oxigénio inflamam, criando assim longas chamas em poucos segundos. Este fenómeno tem a denominação inglesa de *backdraft* [8].

Em outras situações mais usuais no interior de um edifício essa mesma abertura renova o ar interior do compartimento e “regenera” a combustão, aumentando de forma quase instantânea a intensidade do incêndio, o qual decorre até que todo o material combustível no compartimento seja consumido. Nestas condições, diz-se que o incêndio é controlado pela carga de incêndio.

3.2.5. Fase de declínio

Como é possível de verificar na figura 3.1, a dada altura o incêndio entra numa fase de declínio até à sua extinção. Nessa fase de declínio, o incêndio diminui a sua intensidade à medida que os materiais combustíveis são consumidos, decrescendo assim a quantidade de calor produzida.

O incêndio é consequência de um conjunto de fenómenos físicos e depende de um grande número de parâmetros, como o volume e a geometria do compartimento, a natureza e a quantidade dos materiais combustíveis e a existência ou não de ventilação suficiente no compartimento. Devido a estes variados factores, nem todos os incêndios têm um desenvolvimento completo, podendo existir circunstâncias que condicionem a propagação do incêndio de tal forma que este nem chegue a atingir a fase de inflamação generalizada. Essas circunstâncias podem ser de variados tipos, desde acções directas como a intervenção de equipas de intervenção especializadas (bombeiros ou sistemas de extinção) até acções indirectas relacionadas com as características do edifício, como insuficiência de comburente ou reduzida carga de incêndio.

3.3. Propagação de um fogo no interior de um edifício

A propagação de um incêndio no interior de um edifício deve ser tida em conta num projecto de protecção contra incêndios, de forma a prevenir não só a propagação do fogo como também o escoamento de fumos e gases quentes desde a zona de foco de origem do incêndio às zonas adjacentes. É pois desejável, no caso de ocorrência de um incêndio, que o calor e os fumos não se propaguem com facilidade, possibilitando assim a evacuação segura dos ocupantes e a intervenção eficaz das equipas de salvamento, bem como a redução de danos materiais no foco de incêndio e nos compartimentos adjacentes.

Como foi anteriormente mencionado, a propagação de um incêndio desde o compartimento de origem para outras zonas adjacentes pode ocorrer de várias formas, ocorrendo geralmente através de fenómenos físicos de transmissão de calor como condução, convecção e radiação. A propagação do incêndio geralmente ocorre apenas após a inflamação generalizada do compartimento, sendo a partir dessa fase que o incêndio atinge maiores proporções, tanto em termos de aumento de temperatura (por condução e convecção) como de emissão de radiação.

Para além da geometria do compartimento, os elementos de compartimentação têm um papel importante na propagação de um incêndio, especialmente na transmissão de calor por condução, variando esta com a resistência dos materiais ao fogo.

Em geral, o revestimento de piso apresenta fraca contribuição para o desenvolvimento de um incêndio, sendo apenas determinante no caso de um incêndio de pequenas dimensões cuja intensidade não seja suficiente para inflamar os revestimentos de paredes e tecto. Nessa situação, o revestimento de pavimento pode contribuir como meio de propagação do incêndio entre materiais combustíveis existentes na sua proximidade.

Já os revestimentos de parede e tecto se revestem de maior importância na propagação de um incêndio. De facto, um revestimento de parede com características inflamáveis origina uma rápida propagação das chamas até ao tecto. Caso os revestimentos de parede apresentem características pouco inflamáveis ou o incêndio ocorra a uma distância tal que não inflame o revestimento de parede, então a propagação do incêndio será significativamente mais lenta. Por sua vez, sendo o tecto de um edifício uma zona

que raramente não é atingida por fumos, gases a altas temperaturas e até chamas, o seu revestimento apresenta um papel de extrema importância na propagação de um incêndio.

A ventilação é outro factor importante na propagação do fogo num edifício, dado que a quantidade de oxigénio no interior de um compartimento determina o desenvolvimento do incêndio. Como a disponibilidade de oxigénio é dependente das aberturas existentes no edifício, caso essas aberturas forneçam uma baixa quantidade de oxigénio, existirá uma proporção elevada de produtos resultantes da combustão para uma percentagem insuficiente de oxigénio, pelo que a combustão não chega a ser completa. Assim em alguns casos, o incêndio pode nem chegar ao ponto de inflamação generalizada. Contudo, a existência de aberturas que forneçam ventilação suficiente permite que o incêndio progrida rapidamente, possibilitando assim a sua propagação a zonas adjacentes no edifício.

A propagação de um incêndio entre locais de um mesmo edifício pode também ser o resultado dos elementos de compartimentação não resistirem às altas temperaturas provocadas pelo incêndio e a sua ruptura permitir uma abertura para o incêndio se propagar a outros locais do edifício.

O fenómeno de transmissão por condução de calor através dos elementos de compartimentação pode também contribuir para a propagação de um incêndio. De facto, mesmo que os elementos de compartimentação sejam providos de suficiente resistência ao fogo, a sua condutividade térmica pode resultar directamente num aquecimento dos elementos dos compartimentos adjacentes que, se atingirem o seu ponto de ignição, entraram em combustão propagando-se assim o incêndio a outros compartimentos.

A existência de descontinuidades no edifício, sejam elas verticais ou horizontais, representa um risco na propagação de um incêndio. A existência de zonas técnicas atingidas pelo fogo pode propiciar uma forma de propagação denominada de *efeito chaminé*. Este efeito dá origem à rápida propagação das chamas, fumos e gases a altas temperaturas e a grandes distâncias. Este fenómeno pode dar origem à propagação do incêndio entre pisos de um edifício, sendo essa propagação agravada caso existam materiais combustíveis nessas zonas.

A fase de combustão contínua é aquela onde são atingidas as temperaturas mais elevadas. Assim, é nesta fase em que as correntes de convecção mais se fazem sentir, provocando o escoamento de gases quentes e chamas pelas aberturas superiores do compartimento, portas abertas, janelas abertas, envidraçados que cederam às altas temperaturas, zonas horizontais comuns, escadas não enclausuradas e redes técnicas, propagando assim o incêndio a outros compartimentos do edifício.

3.3.1. Propagação de incêndio em comunicações horizontais comuns

Geralmente o incêndio não tem origem em zonas de comunicação horizontais comuns, apenas se propagando desde outros compartimentos a estes espaços caso as portas sejam não enclausuradas ou os elementos de compartimentação não resistam às altas temperaturas.

Assim, a invasão das chamas, gases quentes e produtos resultantes do incêndio vai incidir principalmente a nível do tecto, sujeitando este a altas temperaturas e podendo fazê-lo entrar em combustão, dependendo dos materiais de que é revestido. Se o tecto das comunicações horizontais for revestido de materiais com baixa resistência ao fogo e inflamáveis, a transferência de calor por radiação entre o tecto e os materiais existentes nestes compartimentos pode contribuir para a propagação do incêndio.

3.3.2. Propagação de incêndio por espaços de difícil acesso

As zonas de difícil acesso no interior de um edifício, como galerias técnicas tectos falsos, estão na grande maioria das vezes repletos de materiais combustíveis tais como isolamentos térmicos, tubagens diversas, redes de comunicações e redes eléctricas. Assim, podem não só ser locais onde se inicia o foco de incêndio, como desempenhar um papel relevante na propagação do mesmo.

Sendo estes espaços geralmente compartimentos com dimensões reduzidas, em caso de incêndio a sua temperatura interior vai aumentar rapidamente através de mecanismos de convecção dos gases a altas temperaturas, associados à inflamação dos materiais combustíveis existentes nesses espaços, pelo que o fogo se propaga com extrema

facilidade. Caso estes locais sejam penetrados por um incêndio, a existência de ductos verticais ou horizontais com protecção débil vai propiciar a propagação de gases a altas temperaturas e fumos resultantes da combustão a outros compartimentos adjacentes, propagando assim o incêndio à generalidade do edifício.

Em muitos casos, a passagens de tubagens para os diferentes níveis de um edifício é realizada numa única zona, através de um único ducto vertical. Este ducto vai propiciar a propagação dos gases a altas temperaturas e fumos entre diferentes níveis. Estes ductos apresentam pois um comportamento similar a uma chaminé, ocorrendo pois o *efeito chaminé* mencionado anteriormente.

Em resumo, a propagação de um fogo no interior de um edifício está intimamente ligado ao compartimento onde o fogo tem a sua origem, sendo dependente da ventilação do espaço, dos materiais existentes no seu interior e dos seus comportamentos quando sujeitos ao fogo, sejam combustíveis ou não. Depende também dos elementos de compartimentação e das suas características de resistência, bem como da existência ou não de sistemas de extinção de incêndios (automáticos ou manuais).

3.3.3. Carga de incêndio de um compartimento

Na concepção do projecto de um edifício, uma das primeiras preocupações é saber qual a sua utilização. Assim, para realizar o projecto de forma que o edifício seja “seguro” contra um incêndio, há que avaliar a energia à qual o edifício vai estar sujeito.

A quantidade de energia está relacionada com o material combustível existente na normal utilização do edifício. Esta grandeza tem um carácter variável, visto que depende do tipo de utilização do edifício ao longo do tempo. Logo, existe uma parte denominada por carga móvel que é independente do tipo de construção e não se mantém constante ao longo do tempo. Apesar desta quantidade de energia ser variável, a sua quantificação é de extrema importância para que seja possível prever o comportamento e desenvolvimento de um incêndio.

Essa quantidade de energia, denominada por *carga de incêndio* de um edifício, é definida como a quantidade de calor ou o potencial calorífico libertado durante uma combustão completa dos materiais combustíveis existentes no recheio dos

compartimentos, tais como: revestimentos de piso, tecto e paredes, mobiliário e arquivos.

A carga de incêndio é obtida a partir da totalidade dos materiais combustíveis no interior dos compartimentos, sendo dada pelo somatório dos produtos das massas em quilogramas de cada material combustível pelo seu poder calorífico. O produto da massa pelo poder calorífico representa a quantidade de calor emitida pela massa de um elemento que é completamente consumido. A carga de incêndio é geralmente expressa em kJ ou kcal, sendo a densidade de carga de incêndio a carga de incêndio por unidade de área do compartimento (ou por unidade de volume, caso o edifício se destine principalmente a funções de armazenamento) [10,12].

3.4. Propagação de incêndio pelo exterior do edifício

É frequente um incêndio num edifício propagar-se para os edifícios adjacentes. Esta propagação pode ocorrer por meio de variados mecanismos, de entre os quais: propagação do fogo entre as coberturas, desde o edifício de origem do incêndio para os adjacentes, fenómenos de transferência de calor e de inflamação; propagação de fogo através dos revestimentos exteriores para outras zonas do edifício de origem e para os revestimentos adjacentes.

3.4.1. Propagação de incêndio em coberturas

De um modo geral as coberturas de edifícios não são zonas onde um incêndio deflagra, contudo são frequentemente um meio por onde este se propaga. De facto, uma cobertura, apesar de raramente estar na origem de um incêndio, pode ser atingida pelo fogo quando este atinge o tecto do compartimento imediatamente abaixo e este não resiste às altas temperaturas, cedendo e perdendo assim as suas características de barreira.

Dessa forma, a fim de evitar a propagação do fogo em coberturas e através das mesmas, as coberturas devem ser construídas de forma a apresentar um bom comportamento ao fogo. Dado que o fogo pode ter origem tanto no interior como no exterior, caso o fogo

tenha a sua origem no exterior do edifício e se propague através dos revestimentos de fachada até à cobertura, esta deve ser constituída por materiais não inflamáveis ou pouco combustíveis, de forma a limitar a propagação do incêndio [6].

3.4.2. Propagação do incêndio a edifícios adjacentes

A propagação de um incêndio a edifícios adjacentes deve-se essencialmente a processos de transferência de calor por condução, por radiação através de janelas, de portas e da parede opaca da fachada do edifício, pela passagem de chamas através dos elementos de compartimentação que separam dois edifícios adjacentes, pelo contacto directo das chamas projectadas para além do espaço reservado entre edifícios (caso este exista) ou através de projecteis incandescentes resultantes de explosões.

A propagação de um incêndio entre edifícios através de processos de transferência por radiação não é invulgar: é possível que na ocorrência de um incêndio num edifício, os revestimentos de fachada exterior do edifício do lado oposto da rua sofram decomposição e entrem mesmo em combustão se for atingida a sua temperatura de ignição. O risco de propagação de um incêndio por radiação é bastante elevado, sendo este um dos principais factores de propagação. Assim, foram realizados diversos estudos no sentido de avaliar os riscos de propagação de incêndios por radiação e avaliar a distância mínima entre edifícios e as correspondentes características requeridas para os revestimentos exteriores [6].

Contudo, a radiação não é o único factor responsável pela propagação de incêndio a edifícios adjacentes. Mesmo que sejam estabelecidas restrições ao nível dos revestimentos, tais condições apenas dizem respeito à probabilidade de propagação de incêndio por ignição dos revestimentos sujeitos a radiação. Assim, também há que ter em conta a dimensão do edifício sujeito ao incêndio, a respectiva carga de incêndio e a distância que separa as fachadas dos edifícios.

As classes mínimas de resistência ao fogo para elementos construtivos são obtidas de acordo com ensaios normalizados e sujeitos a apreciação técnica dos elementos construtivos. O Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios [11] define exigências mínimas de resistência ao fogo para elementos construtivos de

paredes de fachada, dependentes da altura do edifício e distâncias mínimas entre fachadas em confronto.

3.4.3. Propagação de incêndio através de elementos exteriores

No decorrer de um incêndio a um dado nível é frequente a sua propagação pelo exterior para os níveis superiores através das aberturas nas fachadas. Esta propagação vertical do incêndio é consequência de fenómenos de transferência por convecção e radiação provocados pelos gases quentes e chamas que ao atravessarem as aberturas de fachada têm a tendência a encurvar e formar um arco sobre a fachada, permitindo assim a penetração das chamas novamente no interior do edifício através de aberturas na fachada num plano quase normal ao plano da parede de fachada.

Este fenómeno de encurvamento até um plano próximo do plano normal da parede de fachada, pode encontrar-se em situações onde o edifício está sujeito a ventos dominantes normais à fachada.

A forma de atenuar este meio de propagação seria retirar as aberturas na fachada de um edifício, mas tal é geralmente impraticável. Contudo, esta forma de propagação de incêndios pode ser atenuada através da redução do tamanho das aberturas em fachadas, do aumento do espaçamento entre aberturas em níveis sucessivos e da aplicação sobre as aberturas de elementos horizontais (palas ou varandas) com adequada resistência ao fogo e que, quando sujeitos a um incêndio, obriguem a uma deflexão das chamas [6].

4. Classificação do comportamento ao fogo de elementos e produtos de construção

O comportamento de elementos e produtos de construção ao fogo e a classificação desse mesmo comportamento são definidos pelo Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (RJ-SCIE) que por sua vez está estabelecido pelo Decreto-Lei nº 220/2008 [10]. A Portaria nº 1532/2008 [11], emitida posteriormente, aprova o Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (RT-SCIE) complementado por outras formas de legislação como o Despacho nº 2074/2009 [12].

Este novo regulamento é aplicável a todos os edifícios, recintos itinerantes ou ao ar livre, mediante doze utilizações tipo. O regulamento, para além das subdivisões mediante o tipo de utilização, categorias de risco e respectivos locais, apresenta um conjunto de critérios de segurança a impor em diversas fases, as classes mínimas de reacção ao fogo que os materiais de construção devem respeitar, as classes de resistência ao fogo de elementos construtivos e ainda as implicações de natureza urbanística.

Este regulamento inclui várias exigências para a caracterização do risco de incêndio, condições de comportamento ao fogo, condições exteriores, condições de protecção e isolamento, condições de evacuação, condições para instalação de equipamentos e sistemas de segurança, condições para protecção de zona e instalações técnicas, tanto em disposições gerais como em fiscalização.

Para a correcta avaliação dos riscos de incêndio, é de extrema importância avaliar a contribuição que os materiais como os elementos de construção podem ter na origem e no desenvolvimento de um incêndio. Assim, tanto os materiais como os elementos construtivos são sujeitos a uma classificação mediante o seu comportamento ao fogo.

A classificação do comportamento ao fogo é por sua vez feita mediante normas e directivas comunitárias de forma a uniformizar essa classificação para todo o Espaço Económico Europeu (EEE).

4.1. Reacção ao fogo dos materiais de construção

A escolha dos materiais de construção foi até poucos anos apenas tendo em conta as suas características como elemento estrutural ou compartimentação. Contudo com a problemática do fogo, o conceito da reacção dos materiais de construção ao fogo passou a ser aplicado aquando estes materiais estão cobertos pela Directiva de Produtos de Construção (DPC), sendo este conceito referente ao contributo de cada material para a eclosão e desenvolvimento dum incêndio. O Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (RT-SCIE) limita os materiais de acordo com o seu grau de reacção ao fogo, mediante a altura do edifício e o seu tipo de utilização.

As exigências dos materiais de construção quanto à sua adequação no âmbito da Segurança Contra Incêndios em Edifícios (SCIE) tem como fundamento a realização de ensaios de reacção ao fogo, que no intuito de uniformizar os produtos de construção na Comunidade Europeia, deverão ser realizados respeitando a Decisão da Comissão Europeia 2000/147/CE de 8 de Fevereiro de 2000, onde se aplica a Directiva 89/109/CEE do Conselho de 21 de Dezembro de 1988, relativamente à classificação dos produtos de construção no que diz respeito ao seu desempenho de reacção ao fogo, de forma que sejam aceites pela Directiva de Produtos de Construção.

Este processo de certificação e controlo de qualidade tem como principal objectivo uniformizar os materiais de construção e assim transmitir confiança na qualidade da informação prestada no que se refere ao produto ou serviço adquirido pelo utilizador desses materiais, visando estabelecer ainda condições necessárias à livre comercialização de diferentes matérias de construção no Espaço Comunitário Europeu.

A Directiva Comunitária dos Produtos de Construção, pela Directiva 93/68/CEE, comprova a conformidade dos produtos de construção segundo um conjunto de exigências que estabelecem as condições necessárias para que aos produtos de construção seja atribuída uma marcação CE.

No que diz respeito à classificação de reacção ao fogo dos produtos de construção, este sistema de classificação europeia está definido em pormenor na norma europeia EN 13501-1:2007+A1:2009 [15], onde estão definidos os procedimentos para a classificação dos produtos de construção quanto à sua reacção ao fogo, podendo estes ser testados de forma singular ou segundo soluções construtivas mais heterogéneas. Por

exemplo, as soluções construtivas compostas por sistemas compósitos multi-camadas, sofrem a necessidade de avaliação do conjunto. Na regulamentação de segurança contra incêndios em edifícios, os produtos de construção estão sujeitos a uma classificação mínima de segurança de acordo com a sua aplicação e utilização do edifício.

Para que seja avaliado o desempenho dos produtos de construção, estes estão sujeitos a cinco ensaios europeus de reacção ao fogo dos produtos de construção. A avaliação é feita de acordo com os resultados obtidos nesses ensaios, sendo eles:

- *Ensaio de não-combustibilidade*, onde é avaliada a produção de calor e de chama dos materiais quando sujeitos a temperaturas elevadas, sujeitando o material a uma situação de fogo normalizado (ensaio do forno ISO) em pleno desenvolvimento;
- *Ensaio de poder calorífico*, onde é avaliado o poder calorífico superior de um produto homogéneo resultante da sua total combustão (este ensaio está vulgarmente associado ao ensaio do forno ISO);
- *Ensaio SBI*, onde são avaliados vários aspectos do desempenho dos materiais ao fogo quando estes estão submetidos à acção das chamas. Neste ensaio são avaliados aspectos como: a taxa desenvolvimento do fogo (também conhecido por índice *FIGRA*); a taxa de desenvolvimento do fumo (também conhecido por índice *SMOGRA*); o calor total libertado; a produção total de fumo; a propagação lateral da chama; a ocorrência de queda gotas ou partículas inflamadas e a duração da inflamação [10];
- *Ensaio de ignitabilidade*, ou de pequena chama, onde é avaliada a facilidade de ignição de um produto quando este é sujeito à incidência directa de uma pequena chama;
- *Ensaio do painel radiante*, onde é avaliado o desempenho de produtos destinados a revestimentos de piso quando este é sujeito ao fogo. Este ensaio tem como objectivo determinar a propagação da chama num revestimento de piso estando este sujeito a um gradiente térmico radiativo e uma chama piloto.

Mediante os resultados obtidos nos cinco ensaios, é então atribuída uma classificação ao produto ou sistema construtivo. As classes de reacção de produtos de construção são então designadas de A1, A2, B, C, D, E e F, mas para melhor caracterizar um produto de acordo com a sua produção de fumos e formação de gotas inflamadas, é atribuída

uma classificação adicional s1, s2 e s3 para classificar a produção de fumos; e d0, d1 e d2 para classificar o produto quanto à formação de gotas inflamadas. Todas as classes principais são complementadas pelas classes adicionais (ex. B-s1,d0; D-s3,d2; etc.), à excepção das classes A1 e F, visto que não contribuem para o fogo [9].

As classes de reacção têm a seguinte designação:

- A1 – Produtos que não contribuem de todo para o fogo;
- A2 – Produtos que não contribuem significativamente para o fogo
- B – Produtos que contribuem para o fogo numa extensão muito limitada;
- C – Produtos que contribuem para o fogo numa extensão limitada;
- D – Produtos que contribuem para o fogo numa extensão aceitável;
- E – Produtos cuja reacção ao fogo é aceitável num período de exposição pequeno a uma chama pequena;
- F – Produtos que não têm reacção ao fogo determinada e que não podem ser classificadas nas outras classes.

As classes adicionais têm a seguinte designação:

- s1 – Produção de fumo muito reduzida;
- s2 – Produção de fumo limitada;
- s3 – Produção de fumo não satisfaz as condições s1 e s2;
- d0 – Não existe formação de partículas ou gotículas inflamáveis;
- d1 – Formação de partículas ou gotículas inflamáveis, mas que se extinguem rapidamente;
- d2 – Formação de partículas ou gotículas inflamáveis, mas que não satisfaz as condições d0 e d1.

Para que produtos de construção transitem livremente pelo Espaço Económico Europeu, é necessário que estes produtos sejam portadores de classificação europeia de reacção ao fogo, sendo esta classificação obrigatória aos produtos sujeitos à marcação CE.

Em Portugal, o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios impõe exigências de reacção ao fogo para os materiais de construção, sendo que estes devem possuir relatórios de classificação emitidos pelos organismos acreditados e competentes para esse efeito. Assim, os relatórios de classificação devem ser emitidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), ou por parte de organismos acreditados no âmbito do Sistema Português da Qualidade (SPQ).

4.2. Resistência ao fogo dos elementos de construção

Aos elementos construtivos, sejam eles elementos estruturais de compartimentação ou revestimentos, é exigida resistência ao fogo. Assim, o regulamento impõe exigências de resistência ao fogo para elementos construtivos, exigências essas baseadas em relatórios de classificação emitida por organismos acreditados no âmbito do SPQ.

A classificação de resistência ao fogo é determinada em função do tempo em minutos em que o elemento construtivo ou sistema construtivo resistem em condições de incêndio normalizado (ISO 834) [17] e mantendo as suas características resistentes. Este sistema de classificação europeu de resistência ao fogo está descrito em pormenor na norma europeia EN 13501-2:2007 [16], bem como todos os ensaios aos quais devem ser sujeitos os vários elementos de construção. Esta norma especifica os procedimentos a ter em conta para a classificação de produtos e elementos construtivos, de acordo com os dados resultantes de ensaios de resistência ao fogo e emissão de fumos.

Para a classificação de resistência ao fogo, a norma EN 13501-2:2007 diferencia os elementos construtivos para o fim a que se destinam, sendo feita a seguinte diferenciação:

- Elementos com capacidade portante, tendo ou não função de corta-fogo (paredes, pisos, elementos estruturais, coberturas, etc.);
- Elementos sem capacidade portante (paredes, pisos, coberturas);
- Instalação de serviços;
- Elementos de cerramento de vãos (portas e janelas).

Para cada uma destas diferenciações, as exigências de resistência ao fogo são distintas. Tais exigências são estabelecidas segundo os seguintes parâmetros [10]:

- **R** – Capacidade de suporte de cargas;
- **E** – Estantiquidade à emissão de chamas e de gases quentes;
- **I** – Isolamento térmico a temperaturas elevadas;
- **W** – Radiação;
- **M** – Acção mecânica;
- **C** – Fecho automático;
- **S** – Passagem de fumo;
- **P** ou **PH** – Continuidade de fornecimento de energia;
- **G** – Resistência ao fogo;
- **K** – Capacidade de protecção contra o fogo.

5. Controlo da propagação de incêndio

Um incêndio é considerado como uma situação accidental, as suas causas são accidentais e a sua eclosão é geralmente de difícil previsão. Contudo, podem ser criadas condições preventivas num edifício que permitam detectar, confinar e extinguir um incêndio antes que este entre em fase de inflamação generalizada, sendo possível assim salvaguardar a integridade de bens e principalmente de vidas humanas.

O início do foco de incêndio nem sempre é presenciado e nem sempre existem pessoas ao seu redor que possam dar o alarme e prestar auxílio à sua extinção numa fase primário. Existe então a necessidade de criar condições ou medidas preventivas para a sua detecção automática de um incêndio antes que este atinja a fase generalizada.

Quando surge um foco de incêndio num compartimento confinado, é necessário que este apresente características adequadas de resistência ao fogo de forma a evitar a propagação das chamas, fumos e gases a altas temperaturas aos compartimentos adjacentes, pelos processos referidos em capítulos anteriores.

Quando ocorre um incêndio, a detecção tem a importante função de alertar para o acidente que se desenrola e o confinamento tem a função de impedir a sua propagação aos compartimentos adjacentes. Contudo, como foi referido anteriormente, a resistência ao fogo é limitada, degradando-se ao longo do tempo em que decorre o incêndio. É pois necessário extinguir o incêndio, pelo que a Autoridade Nacional de Protecção Civil (ANPC) é um organismo com um valor inestimável tanto na intervenção directa ao incêndio como no socorro aos ocupantes do edifício. Contudo, a ANPC não consegue ser onnipresente, pelo que o período desde que é dado o alarme até à chegada do corpo de bombeiros ao local pode ser crucial para a propagação do incêndio.

Assim, de forma a salvaguardar a integridade de bens e vidas humanas, os edifícios devem ser projectados com condições de primeira intervenção de combate a incêndios. Contudo estas medidas de extinção de incêndios apesar de muitas das vezes apresentarem condições técnicas para o controlo e extinção de um incêndio quando este está ainda na sua fase de propagação, devem ser consideradas como sendo apenas preventivas, nunca servindo como substituição da intervenção do SNB.

5.1. Mecanismos de controlo e extinção

O conhecimento do fenómeno da combustão é imprescindível para compreensão dos processos que levam ao seu controlo e extinção, facilitando assim a apreciação de diversos agentes extintores de forma a aplicar os mais adequados em cada caso [8].

Relembrando o conceito básico do tetraedro do fogo anteriormente explicado, este refere quatro factores necessários para que a combustão se inicie e mantenha:

- Combustível;
- Comburente;
- Energia de activação;
- Reacção em cadeia.

Assim, o controlo e extinção de um incêndio por parte de uma acção exterior tende a passar pela eliminação ou redução de um ou mais elementos que compõem o tetraedro do fogo. Desta forma, basta intervir com os seguintes mecanismos de extinção:

- Arrefecimento – dá-se uma redução da energia de activação, pela diminuição da temperatura do espaço físico envolvente e consequente diminuição da temperatura do combustível;
- Carência ou diluição – é feita uma intervenção directa no combustível envolvido na reacção de combustão, passando pela sua redução ou mesmo eliminação;
- Asfixia e abafamento – são duas formas de intervenção na reacção de combustão, por redução de comburente (para a asfixia da combustão) ou eliminação do comburente (para o abafamento);
- Catálise negativa ou inibição – é feita uma intervenção externa, cortando as reacções em cadeia.

Para que a extinção de um incêndio seja feita de uma forma eficiente, em geral há que proceder à combinação dos mecanismos anteriormente referidos.

5.1.1. Arrefecimento

Como foi referido em capítulos anteriores, o incêndio pode propagar-se por fenómenos de transferência de energia, nomeadamente condução, convecção e radiação, levando a que no espaço físico envolvente, os materiais combustíveis mesmo não estando em contacto directo com a chama, sofram um aumento de temperatura.

Quando se atingirem as temperaturas características de um dado material combustível, este pode entrar em ignição e propagar desta forma o incêndio. Contudo, ao arrefecer o material combustível envolvido na reacção de combustão, assim como todos os existentes no espaço físico envolvente, é possível reduzir os níveis de temperatura, impedindo assim a combustão e a sua propagação.

Este mecanismo de extinção é mais usual e eficaz para combustíveis no estado sólido ou como será referido mais adiante, em fogos da classe A. Para que se processe este mecanismo é necessária uma absorção de elevadas quantidades de calor, sendo frequente a utilização de água ou dióxido de carbono (CO₂) como elementos extintores [8].

5.1.2. Carência ou diluição

A carência consiste num mecanismo de extinção onde ocorre uma redução ou eliminação do combustível já envolvido nas reacções de combustão ou do combustível na sua vizinhança que, estando exposto ao incêndio, pode vir a intervir na reacção.

Este meio, por si só, não garante uma rápida extinção do incêndio, uma vez que o combustível será consumido até à extinção do incêndio por carência de combustível. Para originar essa carência, esta pode ser realizada de três formas distintas:

- Retirar o combustível ainda não envolvido do alcance do foco de incêndio. Neste tipo de situação, o foco de incêndio é isolado do restante material combustível, dificultando-se assim a sua propagação e facilitando os meios de extinção por meios de ataque adequados, como extintores ou utilização de água.
- Retirar o fogo do alcance do combustível ainda não envolvido na reacção. É isolado o foco de incêndio do material combustível envolvente, dificultando a

sua propagação e facilitando os meios de extinção por meios de ataque adequados, como extintores ou a utilização de água.

- Divisão da matéria inflamada. A dispersão do material combustível é uma prática relativamente frequente quando o fogo é da classe A e os materiais combustíveis podem ser facilmente dispersos, separando-se assim os que ainda não sofrem os efeitos das chamas dos que já contribuem de forma activa para o incêndio. Pode-se proceder deste modo com toros de madeira, volumes de papel, fardos de palha e outros materiais que possam ser aglomerados em volumes.

Estas três formas de originar carências de combustível têm em comum a necessidade de diminuir a carga de incêndio de um local, mesmo que apenas por breves momentos. Mesmo sendo uma forma pouco rápida de extinção, é eficaz no isolamento do incêndio, minimiza os danos e é eficiente quando combinado com outros mecanismos de extinção, como a utilização de agentes extintores adequados [8].

5.1.3. Abafamento e asfixia

O abafamento e a asfixia de um foco de incêndio são mecanismos de extinção que consistem na sua essência na redução do comburente necessário para que a mistura atinja as proporções adequadas, evitando-se assim a sua participação na reacção de combustão.

O abafamento baseia-se no princípio de limitação do comburente por uma acção exterior, mecânica ou não. O principal objectivo deste mecanismo de extinção é criar uma atmosfera com baixo teor de oxigénio, sendo para esse efeito é frequente a introdução de gases inertes como o dióxido de carbono, o azoto ou o vapor de água. Este mecanismo reduz a propagação do incêndio para os materiais combustíveis envolventes.

Para o efeito de abafamento, o simples facto de isolar a superfície do combustível inflamado recorrendo a uma manta ignífuga sobre o foco de incêndio no caso de combustíveis sólidos e líquidos, ou uma cobertura de espuma extintora no caso de combustíveis líquidos, reduz a mistura de comburente, extingue o incêndio e previne a sua propagação.

A asfixia é um mecanismo similar ao abafamento, não implicando qualquer acção directa mas apenas garantindo que o foco de incêndio se encontra num espaço fechado, onde o próprio processo de combustão acabará por reduzir o teor de comburente na mistura e assim auto-extinguir o incêndio. Contudo, esta técnica tem riscos, visto que numa situação de incêndio não é possível garantir que o mesmo se encontra em ambiente fechado e como tal pode não se extinguir por si só. Por outro lado, mesmo que se proporcione a extinção, a combustão começará a ser incompleta, originando elevadas concentrações de monóxido de carbono (CO) e propiciando-se os riscos de intoxicação e o risco de explosão de fumo (*backdraft*) [8].

5.1.4. Corte da reacção em cadeia

O corte da reacção em cadeia é um mecanismo de extinção que consiste na inibição da reacção em cadeia através da redução da formação de radicais livres característicos de combustões com chama. Deste modo impede-se a transmissão de moléculas do combustível, interrompendo-se assim a reacção em cadeia.

Este mecanismo de extinção é particularmente eficaz para fogos caracterizados por produção de chama intensa, normalmente fogos de classe B e C. Contudo, na grande maioria dos casos este mecanismo de extinção deve ser acompanhado de outros mecanismos, como o arrefecimento, pois de outra forma mantêm-se as condições ideais para a re-ignição da combustão.

5.2. Classificação de fogos e escolha de agentes extintores

O fogo é caracterizado por uma reacção química exotérmica onde intervém um combustível e um comburente. Sendo o ar o comburente mais frequente, são os diferentes tipos de combustíveis e as suas reacções que definem as classes de cada fogo:

- Classe A – fogos envolvendo combustíveis no estado sólido, como madeira, tecidos, borracha, papel e diversos tipos de plástico;

- Classe B – fogos envolvendo combustíveis no estado líquido ou sólidos que passem facilmente para o estado líquido, como óleos, derivados do petróleo, resinas, tintas, plásticos e algumas ceras;
- Classe C – fogos envolvendo combustíveis no estado gasoso, tais como gás natural, hidrogénio, propano e butano;
- Classe D – fogos onde são necessários agentes de extinção especiais, uma vez que esta classe se refere a materiais metálicos combustíveis, como sódio, potássio, cézio e algumas ligas metálicas não auto-inflamáveis como magnésio, titânio e zircónio.

Desta forma, a escolha do agente extintor mais adequado a cada situação depende de vários factores, podendo para o efeito recorrer-se à tabela da norma portuguesa NP 1800 que se representa de seguida.

Classe de fogos	Agente extintor						
	Água		Espuma	CO ₂	Pó Químico		
	Jacto	Pulverizada			ABC	BC	D
A	Bom	Muito bom	Bom	Não	Muito bom	Não	Não
B	Não	Aceitável	Muito bom	Bom	Muito bom	Muito bom	Não
C	Não	Não	Não	Bom	Bom	Bom	Não
D	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Muito bom

Tabela 5.1 – Classe de fogos e agentes extintores [8].

É de notar que os fogos da classe D correspondem a condições muito específicas, geralmente ligados à indústria e, como tal, neles apenas devem intervir as forças de intervenção (SNB) por possuírem conhecimentos e meios especiais para a extinção desta classe tipo de fogo.

5.3. Agentes extintores

Agente extintor é a designação dada a qualquer substância destinada à extinção de incêndios. Estes agentes podem ser de diversos tipos, possuindo assim as mais variadas

propriedades físicas e químicas [8]. Desta forma, a sua aplicação no combate a incêndios rege-se pelas propriedades que os caracterizam e de acordo com critérios específicos para as restrições à sua utilização como no caso de:

- Reacção química com os materiais combustíveis, com eventual contribuição para o agravamento do incêndio;
- Consequências fisiológicas, quer do agente extintor quer de subprodutos provenientes da extinção, que possam contribuir para efeitos de condutividade eléctrica ou outros danos pessoais;
- Efeito da temperatura do foco de incêndio;
- Danos materiais provocados pelos agentes extintores.

Neste capítulo, apenas será feita uma breve abordagem aos seguintes elementos extintores:

- Água;
- Espuma;
- Pós químicos;
- Gases inertes;
- Halon e substitutos de componentes halogenados.

5.3.1. Água

A água, devido à sua disponibilidade, baixo custo de aquisição, capacidade de armazenamento e transporte, é o agente extintor com maior aplicação no combate a incêndios.

Contudo, a sua aplicação generalizada não implica nem sugere que seja vista como agente extintor universal. Existem casos onde a sua aplicação pode produzir mais malefícios do que benefícios, como no caso de incêndios com combustível líquido a altas temperaturas. Nestas situações, a utilização de água como agente extintor, normalmente mais denso que o combustível, vai originar que a água abaixo do combustível e a elevadas temperaturas provoque uma dissociação do oxigénio e

hidrogénio, originando uma violenta reacção de expansão e podendo ajudar à propagação do incêndio através do combustível projectado.

Noutros casos, como em fogos da classe D ou caso existam materiais que possam reagir com água (ácidos, carburetos ou materiais metálicos como sódio), a utilização de água está interdita. Também está vedada a sua aplicação como agente extintor em incêndios em instalações eléctricas ou equipamentos eléctricos, pois a elevada condutividade eléctrica da água pode originar electrocussão do utilizador ou danificar outros equipamentos circundantes.

5.3.1.1. Mecanismos de extinção por água

Devido às propriedades físicas da água, desta podem resultar vários mecanismos de extinção. Estes mecanismos de extinção estão de certa forma diferenciados pela pressão à qual a água está sujeita como elemento extintor [8].

Quando a água é aplicada a uma pressão inferior a 25 bar, funciona como mecanismo de arrefecimento, sendo frequentemente aplicada para o efeito em:

- Redes de incêndio armadas – RIA, com recurso a agulhetas alimentadas por instalações fixas;
- Linhas de mangueiras montadas a partir de veículos de combate a incêndios;
- Instalações fixas de extinção contra incêndio por água, onde são utilizadas cabeças de pulverização, também denominadas por *sprinklers*.

Quando a água é aplicada a uma pressão superior a 25 bar, funciona como mecanismo de abafamento e, apesar de tal ser pouco frequente, pode ser aplicada sob a forma de:

- Água nebulizada, onde a alta pressão e o difusor específico para o efeito vai provocar uma dissociação da água em micro-gotas que, na presença de temperatura “ideais”, vaporizam, diminuindo assim a temperatura ambiente no interior e a concentração de oxigénio no compartimento.

5.3.2. Espumas

A espuma como agente extintor é usualmente aplicada numa vasta gama de incêndios, sendo constituída por uma massa relativamente estável, menos densa do que a água, formada por bolhas de ar envolvidas por uma fina película aquosa [8].

Este agente extintor pode classificar-se em duas grandes categorias:

- Espumas químicas;
- Espumas físicas.

As espumas químicas foram as mais utilizadas nos primórdios deste agente, sendo obtidas através de uma mistura doseada de dois materiais numa reacção ácido-base que, para além de espuma, provocava a libertação de dióxido de carbono que facilitava a fluidez do tapete de espuma resultante. Contudo, o seu comportamento difícil de controlar, os seus custos de utilização e a dificuldade de aplicação, tornaram este tipo de agente extintor pouco viável, quando comparado com espumas físicas.

As espumas físicas, por sua vez, são obtidas através da mistura doseada de água com um emulsor, estabelecendo o doseador as percentagens ideais para a mistura, a qual é combinada com ar através de equipamentos especiais para que seja feita a expansão deste agente extintor.

Contudo, a aplicação das espumas físicas não é universal, pois, visto que é formada à base de água, sofrem das mesmas limitações da água como agente extintor.

A sua aplicação é restrita em incêndios da classe D ou caso existam materiais que possam reagir com a água. Restringe-se ainda a sua aplicação como agente extintor em incêndios em instalações eléctricas ou equipamentos eléctricos, devido à elevada condutividade eléctrica da água, à possibilidade de electrocussão do utilizador e de danos noutros equipamentos circundantes.

Apesar disso, quando aplicada em incêndios com líquidos combustíveis a altas temperaturas, o facto de utilizar água e da mistura de emulsor e ar ser menos denso que o combustível vai originar uma camada de agente extintor à superfície do combustível líquido.

5.3.2.1. Mecanismos de extinção por espuma

A utilização de espuma como agente extintor origina uma camada espuma sobre a superfície livre do material combustível, isolando-o assim do ar, sendo pois o abafamento o principal mecanismo de extinção. A presença de água na sua composição provoca ainda um efeito secundário de arrefecimento dos materiais combustíveis [6,8].

5.3.3. Pós químicos

Os pós químicos secos são os agentes extintores mais generalizados no combate a incêndio, principalmente por, na grande maioria dos casos, a sua utilização estar ligada a equipamentos extintores portáteis.

O sucesso deste agente extintor deve-se a ser fácil de armazenar e a permitir colmatar as falhas de baixa eficácia ou utilização impedida por parte de outros agentes extintores como a água e as espumas.

Os pós químicos apresentam as seguintes características: elevada estabilidade à temperatura ambiente, boa fluidez ao longo de todas as tubagens que compõem o extintor, muito por responsabilidade do compartimento no seu interior com dióxido de carbono (CO_2) ou azoto (N_2) pressurizados, sendo o dióxido de carbono vulgarmente utilizado para extintores de pequenas dimensões e o azoto para grandes dimensões; não apresentam risco de toxicidade, provocando porem dificuldades respiratórias aquando da sua utilização em espaços fechados [8].

5.3.3.1. Mecanismos de extinção por pó químico

A utilização de pó químico como agente extintor actua em diversos mecanismos de extinção, sendo o principal a sua intervenção na reacção em cadeia conhecida como catálise negativa: a aplicação de uma descarga de pó químico na base da chama evita que os radicais livres do combustível se combinem com o comburente, produzindo-se desta forma um efeito redutor na reacção em cadeia [8].

A aplicação de pó químico propicia o abafamento como mecanismo de extinção, uma vez que os pós químicos tradicionais quando sujeitos a altas temperaturas provenientes de um incêndio, provocam a libertação de dióxido de carbono (CO_2). A utilização de alguns tipos de pó químico como o tipo ABC produz também um efeito de abafamento, dado que tais pós originam um resíduo protector sobre materiais combustíveis sólidos que isola a sua superfície livre em contacto com o comburente e dificulta a pirólise dos materiais combustíveis [6].

Uma outra característica associada à utilização dos pós químicos de extinção é o facto de a sua aplicação resultar numa nuvem de pó com uma relativa opacidade, que limita a propagação de energia por efeito de radiação.

5.3.4. Gases inertes

A utilização de gases inertes é devida ao facto destes gases não participarem na combustão nem como combustível nem como comburente, fazendo destes gases óptimos agentes extintores por reduzirem a concentração de oxigénio no compartimento onde são utilizados.

Dos diversos gases inertes normalmente utilizados como agentes extintores, destacam-se o dióxido de carbónico (CO_2), o azoto (N_2) e o vapor de água. O vapor de água tem uma utilização mais limitada, sendo normalmente resultante de extinção por água nebulizada.

5.3.4.1. Mecanismos de extinção por gases inertes

O dióxido de carbono (CO_2) é utilizado como agente extintor essencialmente devido às suas características, pois a sua densidade é cerca de 1,5 vezes superior ao ar à mesma temperatura e a sua descompressão está associada a um choque térmico.

Dessa forma, o dióxido de carbono é caracterizado essencialmente por um mecanismo de extinção por abafamento e arrefecimento. O abafamento resulta do facto anteriormente mencionado da sua densidade ser superior ao ar, o que, sendo um gás

inerte, propicia um ambiente localizado de baixa concentração de oxigénio no foco de incêndio. O processo de mecanismo de arrefecimento é provocado pelo facto da aplicação deste agente extintor se apresentar comprimido, em situação de fogo o dióxido de carbono sofre descompressão o que provoca um rápido arrefecimento quando é aplicado directamente no foco de incêndio [6,8].

O azoto (N_2), apesar de não combustível nem comburente, é um gás menos utilizado como agente extintor devido à sua menor eficácia quando comparado com o dióxido de carbono; contudo, a sua aplicação em sistemas fixos de extinção por inundação total propicia o abafamento como mecanismo de extinção.

Apesar da sua pouca utilização como agente extintor, o azoto apresenta características que o favorecem como agente inertizador, sendo dessa forma utilizado principalmente como medida preventiva na ocorrência de incêndios em condutas e depósitos de combustíveis líquidos ou gasosos [8].

5.3.5. Halon e substitutos de componentes halogenados

O halon foi um gás utilizado como agente extintor durante várias décadas, tendo ao longo dos tempos sofrido algumas alterações ao nível da sua composição química. Nos compostos com base em carbono e hidrogénio, os átomos de hidrogénio foram sendo substituídos por compostos halogéneos, como o flúor, cloro, bromo ou iodo.

Os compostos mais frequentes deste tipo são o halon 1211 (difluoroclorobromometano – CF_2BrCl) com utilização em extintores e o halon 1301 (trifluorobromometano – CF_3Br) com utilização frequente em sistemas fixos de extinção [8].

Este agente extintor actua essencialmente por corte da reacção em cadeia, estando assim associado ao mecanismo de abafamento. Contudo, a sua utilização e comercialização foram proibidas a partir do final de 2003 pelo Regulamento Europeu (CE) n.º 2037/2000 do Parlamento Europeu e do Conselho de 29 de Junho de 2000, por motivos ecológicos decorrentes da destruição da camada do ozono, levando assim à sua substituição.

Assim, os halons foram sendo substituídos por água, espumas, pós químicos, gases inertes e outros gases químicos com comportamento de agente extintor similar ao halon, mas sem malefícios ecológicos para a camada de ozono. O halon 1211 foi substituído pelos seguintes compostos:

- FE-36TM (HFC-236fa – Hexafluoro-propano);
- FE-25TM (HFC-125);
- FE-241TM (HCFC-124).

Por outro lado, o halon 1301, anteriormente com utilização em sistemas fixos de protecção, foi substituído pelos seguintes compostos:

- FM200[®] (HFC-227ea)
- FE-13TM (HFC 23)
- FS49C2 (HCF 3-4-9C2)
- FC3110 (PFC 410 ou CEA 410)
- NAF SIII (HCFC)

5.3.5.1. Mecanismos de extinção por produtos substitutos de componentes halogenados

Tal como os halons, os seus substitutos acima referidos, são agentes extintores com características semelhantes, a sua utilização não deixa resíduos e sendo um gás com comportamento inerte, não contribuem para a combustão nem intervêm directamente na reacção em cadeia, estando relacionados com o abafamento como mecanismo de extinção. A sua utilização em espaços fechados propicia a redução da concentração de oxigénio funcionando como mecanismo de asfixia [8].

6. Curvas de Incêndio

Como foi referido em capítulos anteriores, um incêndio provoca uma série de mecanismos de transferências de temperatura, provocando assim um aumento de temperatura em todo o compartimento, mas essencialmente na zona mais elevada do compartimento onde ficam concentrados fumos, e gases quentes, como se ilustra na figura 6.1.

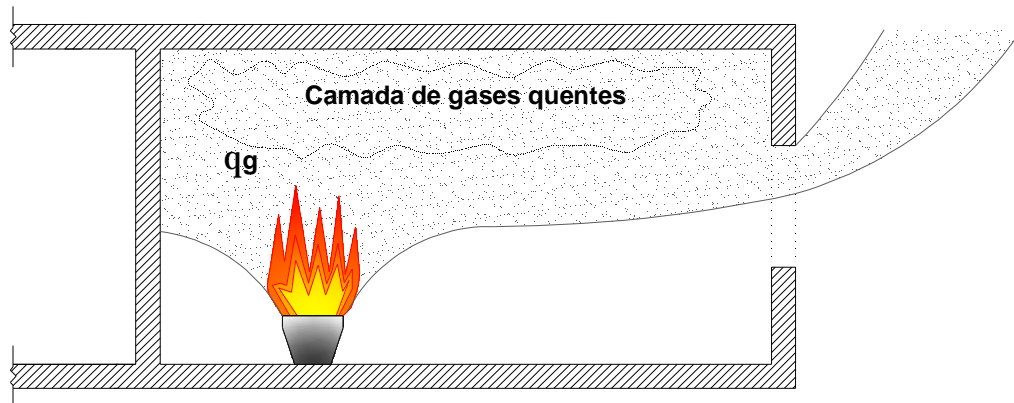


Figura 6.1 – Modelo de diferenciação de temperatura num compartimento na ocorrência de um incêndio.

Sendo um incêndio um fenómeno complexo, a sua descrição de forma matemática é extremamente complicado. Como foi anteriormente referido, o incêndio natural é caracterizado por quatro fases distintas:

- Fase de ignição;
- Fase de propagação;
- Fase de combustão continua;
- Fase de declínio, ou arrefecimento.

Estas fases estão representadas de forma esquemática no gráfico 6.1.

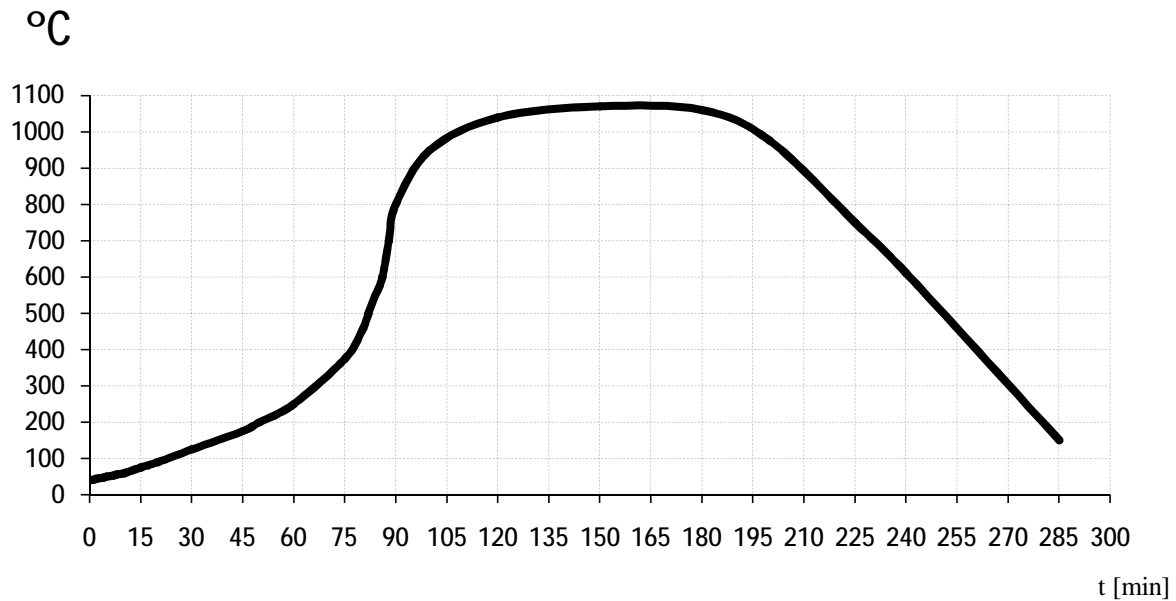


Gráfico 6.1 – Exemplo de curva de incêndio natural [1].

Contudo, a representação de incêndios em edifícios por modelos adequados para a verificação da segurança das estruturas quando sujeitas ao fogo é uma tarefa extremamente complicada [1]. Essa dificuldade é devida à grande variedade de situações que podem influenciar os fenômenos do fogo num compartimento, como: condições de ventilação, geometria, carga de incêndio, materiais que compartimentam o espaço, entre outras variáveis.

Com tantas condicionantes para representar modelos de incêndios em edifícios, para que seja possível a modelação de um incêndio em aplicações correntes, os modelos de incêndio natural devem ser simplificados, mas sem que essa simplificação deixe de representar de forma adequada a influência dos parâmetros que condicionam o comportamento das construções. Dai resultam curvas de variação no tempo da temperatura dos gases na vizinhança dos elementos, curvas de incêndio nominais e paramétricas.

6.1. Curvas de incêndio nominais

As curvas de incêndio nominais são simplificações de incêndios em forma de curvas convencionais preparadas para facilitar a classificação e/ou verificação da resistência ao fogo [2]. De forma a simplificar as curvas, os regulamentos apresentam várias formas

distintas de modelar a temperatura dos gases num compartimento sujeito ao fogo. A norma europeia EN 1991-1-2 estabelece que estas curvas podem ser dadas sob a forma de curvas nominais onde é relacionada a temperatura com o tempo (sejam estas a curva de incêndio padrão, a curva de incêndio para elementos exteriores ou a curva de incêndio em hidrocarbonetos) ou sob a forma de curvas paramétricas, também estas indicando a temperatura no interior do compartimento ao longo do tempo.

6.1.1. Curva de incêndio padrão

A curva de incêndio padrão é usada frequentemente como referência para o estudo do comportamento dos materiais sujeitos a uma situação simplificada de fogo. Esta curva padrão demonstra a evolução convencional de um fogo num compartimento a partir da fase de inflamação generalizada.

A curva ISO 834 [17] é a representação de uma curva normalizada e convencional usada em diversos países para definir o processo térmico normalizado ao qual são sujeitos os elementos ou sistemas de construção segundo ensaios normalizados, que resulta na avaliação dos materiais segundo classes de resistência ao fogo, como demonstra a figura 6.1, onde é feita a comparação da curva ISO 834 com 50 testes em laboratório.

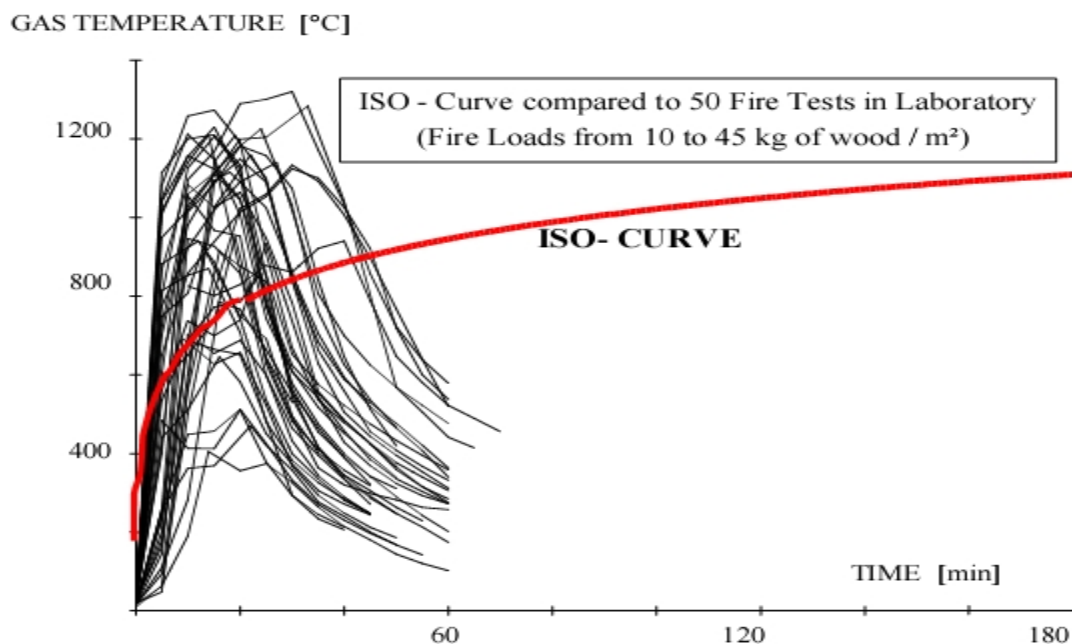


Figura 6.2 – Comparação de curvas de incêndios naturais e curva ISO 834.

A curva de incêndio padrão, definida pela expressão 6.1 e representada no gráfico 6.2, caracteriza-se por possuir um ramo com desenvolvimento ascendente, admitindo que a temperatura dos gases é sempre crescente ao longo do tempo [1, 2].

$$\theta_g = T_0 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad (6.1)$$

Onde,

t – tempo em minutos;

T_0 – temperatura ambiente, usualmente 20 °C;

θ_g – temperatura dos gases em °C.

Como demonstra o gráfico 6.2, a curva de incêndio padrão (ISO 834) apresenta características que estão longe de serem comparáveis a um incêndio real. Isso deve-se ao facto desta curva não contemplar vários parâmetros que condicionam um incêndio, tais como as características do compartimento, a ventilação, o tipo e a quantidade de combustível, mas com parâmetros que ainda assim servem de base para estudo da resistência ao fogo de elementos em fornalha, ou mesmo para a sua consideração na elaboração de projectos, pois a temperatura dos gases no início do incêndio toma valores muito superiores à curva de incêndio padrão, contudo essa variação de temperatura é compensada com o tempo de exposição do combustível a essa temperatura.

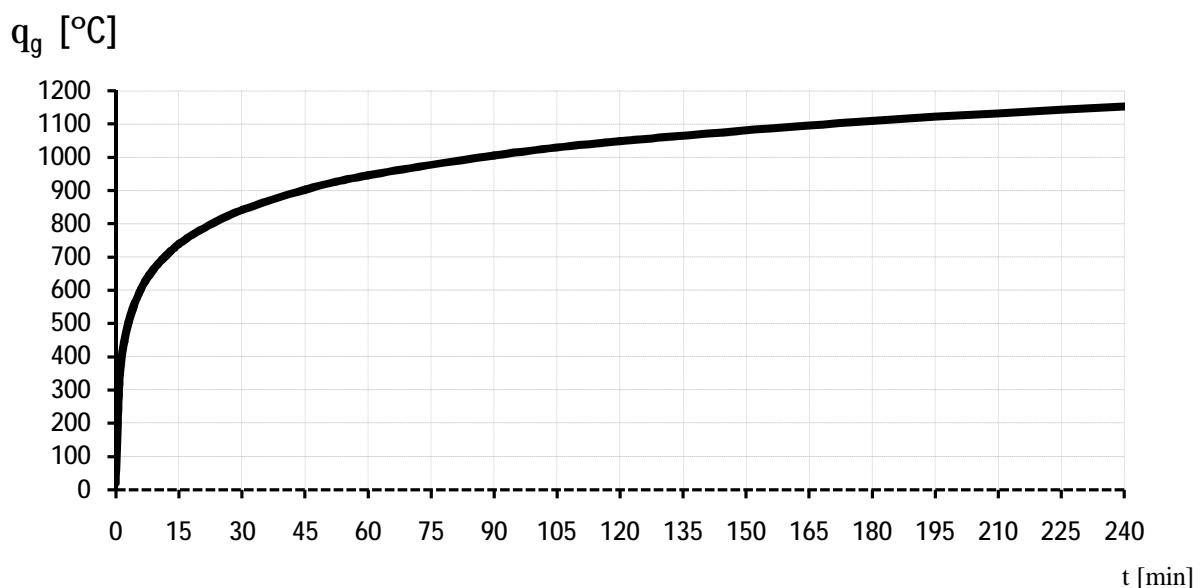


Gráfico 6.2 – Curva de incêndio padrão (ISO 834).

A curva ISO 834, como é perceptível no gráfico 6.2, não manifesta a realidade física de um incêndio num compartimento pelas razões anteriormente mencionadas. Contudo, a curva de incêndio padrão tem mérito na sua utilização pelo simples facto de ser normalizada, unificando os ensaios em fornalha e permitindo assim a comparação dos resultados obtidos em diferentes laboratórios [1].

6.1.2. Curva de incêndio para incêndios de aquecimento lento

A curva de incêndio de desenvolvimento de aquecimento lento descrita na norma EN 13501-2 é uma curva com características semelhantes às da curva padrão ISO 834, com as mesmas condições de aplicação para ensaios de avaliação de resistência ao fogo mas com uma variação diferente nos primeiros minutos do flashover, onde apresenta uma evolução mais lenta da temperatura dos gases no interior do compartimento [16].

Não obstante, dadas as suas características de fogo latente, esta curva apenas deve ser tida em conta para ensaios de resistência ao fogo quando se espera que a temperatura associada ao crescimento do incêndio à qual o elemento é exposto seja reduzida.

A evolução da temperatura dos gases provocada por um fogo latente ao redor de elementos é representada pela seguinte expressão [16].

$$\theta_g = \begin{cases} 154 \cdot t^{0,25} + 20 & , 0 < t \leq 21 \\ 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot (t + 20) + 1) & , t > 21 \end{cases} \quad (6.2)$$

Onde,

t – tempo em minutos;

θ_g – temperatura dos gases em °C.

Como mostra o gráfico 6.3, a curva de incêndio de aquecimento lento, dada a sua herança da curva padrão ISO 834 de apenas considerar o incêndio a partir da fase de inflamação generalizada, apresenta da mesma forma características que estão longe de serem comparáveis a um incêndio real. Isso deve-se ao mesmo facto de também esta

curva não contemplar vários parâmetros que condicionam um incêndio, tais como as características do compartimento, a ventilação, o tipo e a quantidade de combustível. De igual modo, esta curva fornece uma informação conservativa.

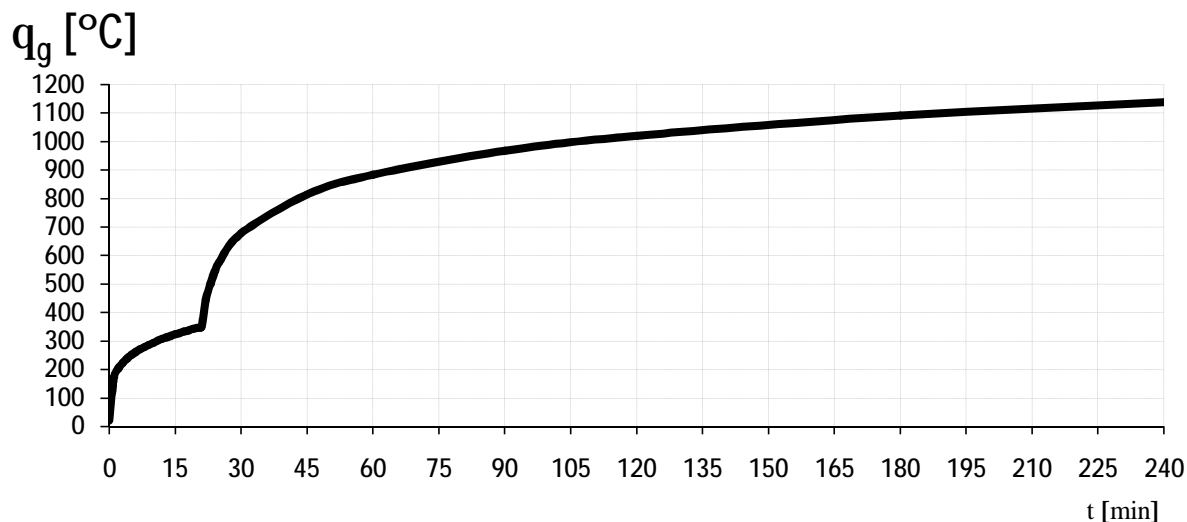


Gráfico 6.3 – Curva de incêndio para incêndios de aquecimento lento.

A consideração desta curva de incêndio é de particular importância para a avaliação do desempenho de elementos onde as temperaturas apesar de elevadas, estejam abaixo de 500 °C, impedindo assim que possa ser considerada directamente a curva temperatura/tempo prevista na norma ISO 834 para a realização de ensaios de classificação para produtos reactivos ou intumescentes [16]. O gráfico 6.4, sendo a comparação da curva de incêndio padrão com a curva de incêndio latente, ilustra o desenvolvimento das curvas normalizadas, bastante diferentes no período inicial mas rapidamente convergentes ao longo do tempo.

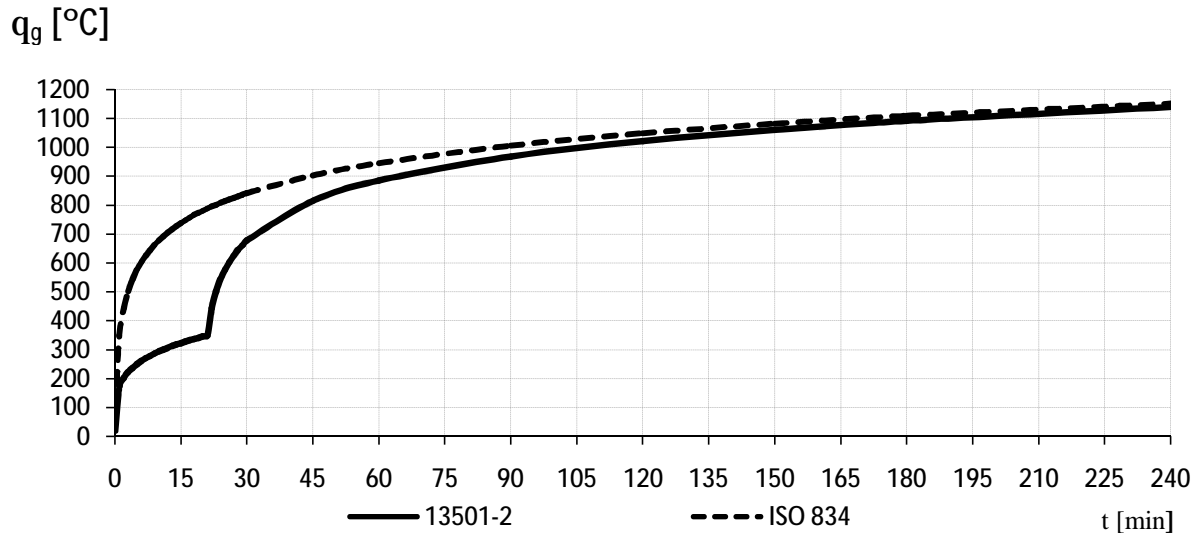


Gráfico 6.4 – Comparação da curva de incêndio padrão curva de aquecimento lento.

Tal como se pode observar no gráfico 6.4 e na equação 6.2, a curva de incêndio de aquecimento lento, está desfasada 21 minutos da curva ISO 834, sendo portanto menos segura no que diz respeito ao cálculo da evolução de temperatura no interior de um edifício, pelo que não será abordada daqui para a frente.

6.1.3. Curva de incêndio para elementos exteriores

No decorrer de um incêndio, como foi referido em capítulos anteriores, é frequente por quebra de vãos envidraçados ou outros elementos de compartimentação, que as chamas se propaguem desde o compartimento até ao exterior, ou ainda que ocorram incêndios no exterior implicando assim um aumento da temperatura dos gases envolventes da superfície dos elementos de fachada.

O incêndio vai assim implicar uma evolução da temperatura dos gases à superfície dos elementos, sendo essa evolução considerada na norma EN 13501-2 [16] pela curva de incêndio para elementos exteriores [1, 2]. Esta curva é igualmente uma relação de temperatura/tempo definida pela expressão 5.3 e representada no gráfico 6.5.

$$\theta_g = 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32 \cdot t} - 0,313 \cdot e^{-3,8 \cdot t}) + 20 \quad (6.3)$$

Onde,

t – tempo em minutos;

θ_g – temperatura dos gases em °C.

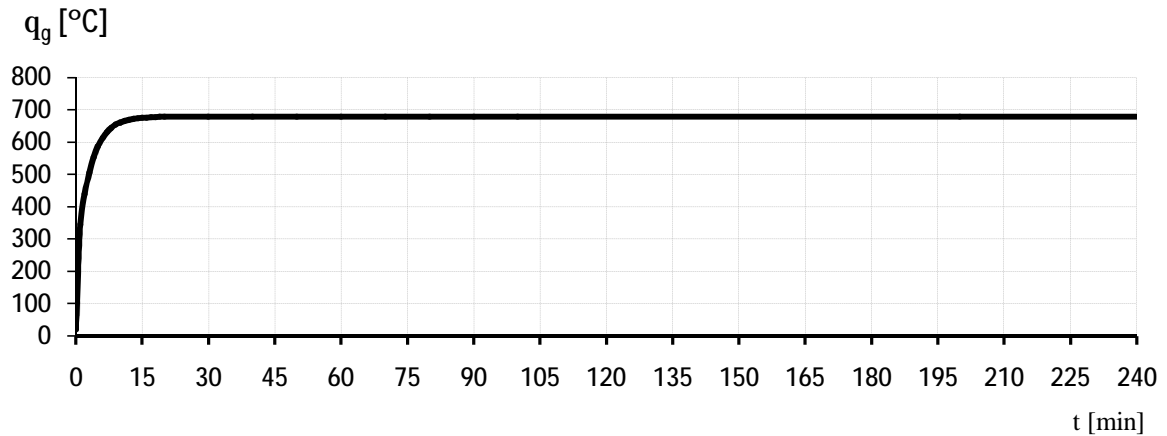


Gráfico 6.5 – Curva de incêndio para elementos exteriores.

De igual forma que a curva de incêndio de aquecimento lento ou latente, também a curva de incêndio para elementos exteriores não será novamente abordada, à exceção do gráfico 6.7, onde é feita a comparação das três curvas nominais.

6.1.4. Curva de incêndio de hidrocarbonetos

Os materiais combustíveis apresentam diferentes comportamentos quando sujeitos ao fogo, e os hidrocarbonetos devido às suas características de inflamabilidade, originam incêndios com características especiais de aumento de temperatura, sendo incêndios muito severos [1]. Os incêndios de hidrocarbonetos podem ser descritos segundo uma curva temperatura/tempo definida pela expressão 6.4 e representada no gráfico 6.6.

$$\theta_g = 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) + 20 \quad (6.4)$$

Onde,

t – tempo em minutos;

θ_g – temperatura dos gases em °C.

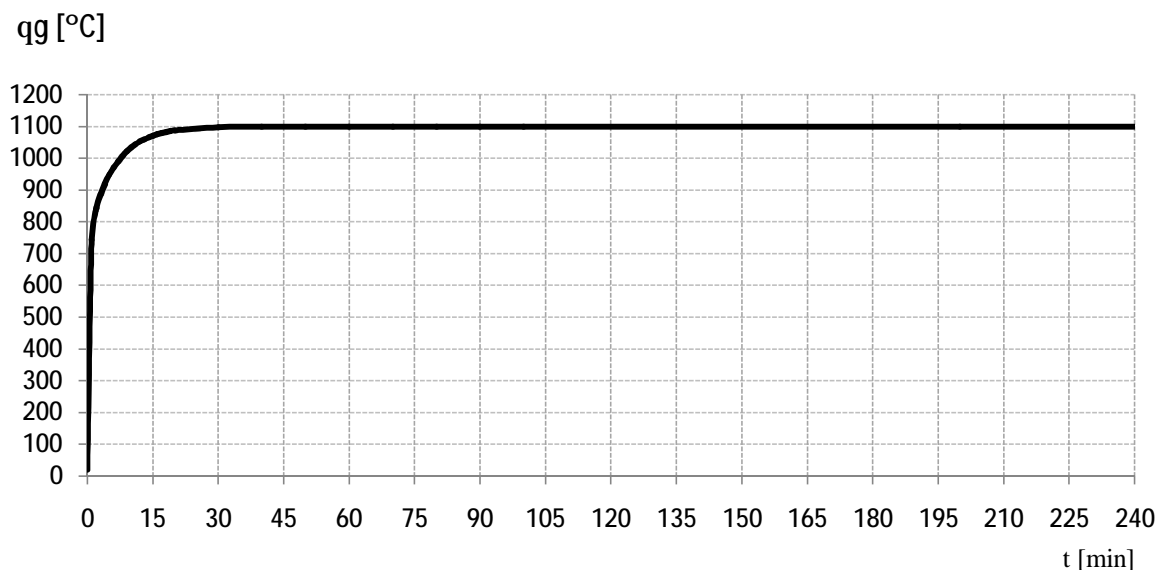


Gráfico 6.6 – Curva de incêndio de hidrocarbonetos.

6.1.5. Comparação das curvas nominais

Como é notório no gráfico 6.7, a curva de incêndio para elementos exteriores é uma curva menos severa do que a curva de incêndio padrão, pois dadas as suas condições de não compartimentação, a temperatura emanada por um incêndio é essencialmente por radiação, levando assim a curva a aproximar-se de um patamar para temperaturas na ordem dos 680 °C.

Já a curva de hidrocarbonetos, dadas as características de rápida inflamação destes combustíveis, apresenta uma rápida evolução da temperatura nos instantes iniciais, muito superior à curva de incêndio padrão, mas tende a estabilizar para valores de temperatura na ordem de 1100 °C. Como é notório no gráfico 6.7, quando decorridos mais de 190 minutos, a curva de incêndio padrão apresenta valores de temperatura mais elevados e logo mais conservativos.

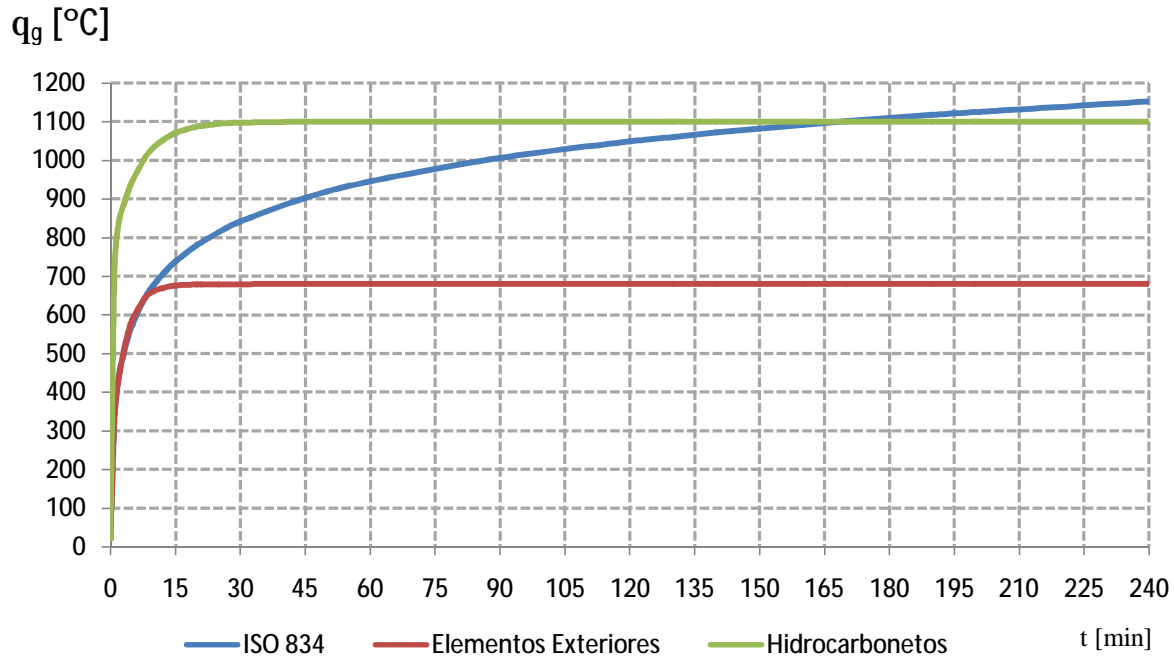


Gráfico 6.7 – Comparação da evolução de temperatura das curvas nominais [1].

6.2. Curvas de incêndio paramétricas

As curvas nominais anteriormente descritas devido às suas características padronizadas e de independência de parâmetros físicos que caracterizem o espaço e o combustível, acabam assim por não se assemelharem a um incêndio real. Desta forma o Anexo A da Parte 1-2 do Eurocódigo 1 [2] define curvas paramétricas para evolução da temperatura em função do tempo, mas estas ao contrário das curvas nominais, são dependentes de diversos parâmetros físicos [1], tais como:

- Densidade de carga de incêndio. Como é de prever, quanto maior for a carga de incêndio, mais tempo dura o incêndio, como demonstra o gráfico 6.10.
- Condições de arejamento, variável dependente da geometria das aberturas, dimensões e distribuição no compartimento. Como será demonstrado mais adiante, a diferença entre um compartimento muito arejado e pouco arejado é bastante importante para o desenvolvimento do incêndio, como demonstra o gráfico 6.9.

- Características do compartimento. As propriedades das paredes envolventes do compartimento onde decorre o incêndio são importantes, pelo facto de paredes que tenham capacidade de absorver quantidade suficiente de energia, limitam a temperatura do incêndio.

As curvas paramétricas, como mostra no gráfico 6.8, apresentam diferenças das curvas nominais, por possuírem não apenas uma fase de aquecimento após o flashover, mas também uma fase de arrefecimento para descrever o declínio do incêndio. Pretendendo assim descrever um incêndio real de uma forma mais aproximada, tendo em conta os factores anteriormente mencionados e a sua influência no desenvolvimento dos incêndios.

Segundo o Eurocódigo 1 – Parte 1-2, as relações tempo-temperatura aí apresentadas assumem que a carga de incêndio no interior do compartimento é totalmente consumida, que os compartimentos não excedem 500 m² de área em planta, 4 m de altura e ainda não apresentam aberturas no tecto [5].

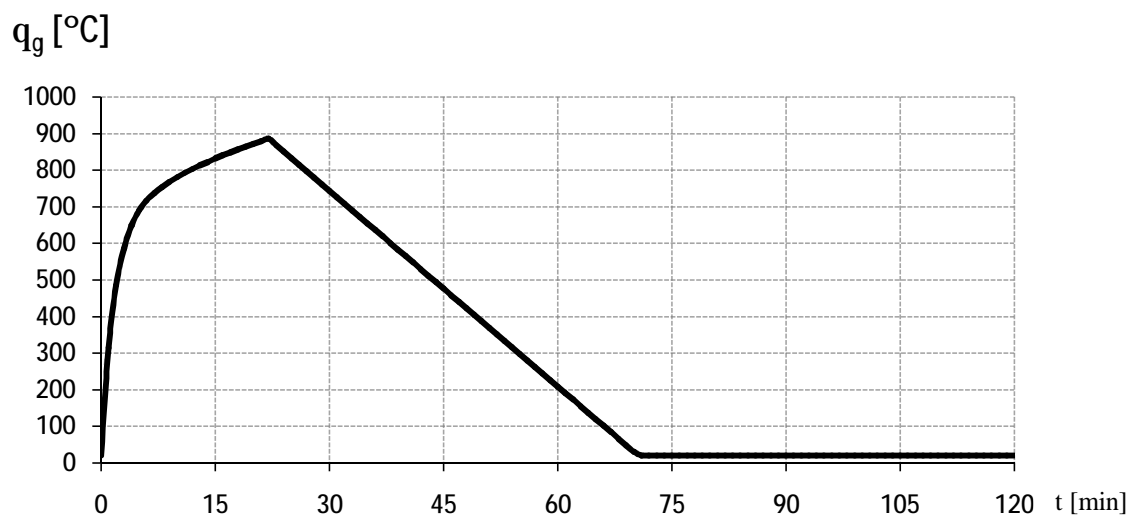


Gráfico 6.8 – Exemplo da evolução de temperatura de uma curva paramétrica.

6.2.1. Fase de aquecimento

A fase de aquecimento é descrita pela seguinte expressão [1,2]:

$$\theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,2 \cdot t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7 \cdot t^*} - 0,472 \cdot e^{-19 \cdot t^*}) \quad (6.5)$$

Onde,

θ_g – temperatura dos gases no compartimento em °C;

t^* – tempo fictício em horas.

$$t^* = t \cdot \Gamma \quad (6.6)$$

Onde,

t – tempo em horas;

Γ - coeficiente de expansão;

$$\Gamma = \left[\frac{O/0.04}{b/1160} \right]^2; \quad (6.7)$$

$$b = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} \quad ; \quad 100 \leq b \leq 2200 - \text{factor } b \text{ em } J/m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K; \quad (6.8)$$

ρ – massa específica da envolvente do compartimento, em kg/m³;

c – calor específico da envolvente do compartimento, em J/kg.K;

λ - condutividade térmica da envolvente do compartimento, W/m.K;

O – Factor de aberturas, em m^{1/2};

$$O = A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} / A_t \quad ; \quad 0,02 \leq O \leq 0,2; \quad (6.9)$$

Onde,

A_v – área total das aberturas verticais em todas as paredes em m²;

h_{eq} – média pesada da altura das aberturas verticais em todas as paredes, em m;

A_t – área total da superfície envolvente do compartimento (tecto, pavimento, paredes, incluindo aberturas), em m².

Onde as áreas e as aberturas são calculadas segundo as seguintes expressões, de acordo com a figura 6.3.

$$A_v = A_1 + A_2 + \dots = B_1 \cdot H_1 + B_2 \cdot H_2 + \dots = \sum A_i \quad (6.10)$$

$$h_{eq} = (A_1 \cdot H_1 + A_2 \cdot H_2 + \dots) / A_v = \sum A_i \cdot H_i / \sum A_i \quad (6.11)$$

$$A_t = 2 \cdot (l_1 \cdot H + l_2 \cdot H + l_1 \cdot l_2) \quad (6.12)$$

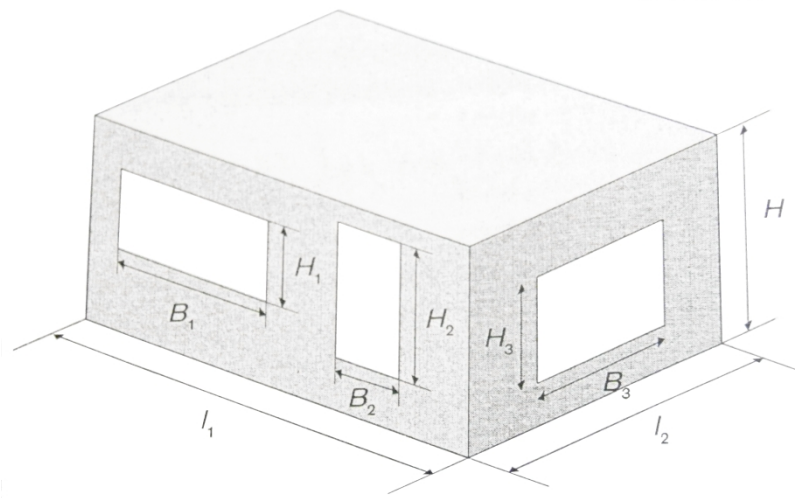


Figura 6.3 – Modelo de aberturas verticais no compartimento [1].

Os factores que influenciam a expressão da curva paramétricas, tais como o factor b , a massa específica (ρ), o calor específico (c) e a condutividade térmica da envolvente do compartimento (λ), devem ser consideradas à normal temperatura ambiente.

Contudo a expressão 6.8 apenas deve ser considerada no caso da envolvente do compartimento se tratar de apenas uma camada. Para ter em conta envolventes com diferentes camadas de material, a expressão sofre os seguintes ajustes:

- Se $b_1 < b_2$ então,

$$b = b_1 \quad (6.13)$$

Onde,

b_1 – referente apenas a uma camada;

b_2 – referente ao sistema de várias camadas.

- Se $b_1 > b_2$, deve ser calculada uma espessura limite (s_{lim}) para o material exposto ao fogo, de acordo com a seguinte expressão:

$$s_{lim} = \sqrt{\frac{3600 \cdot t_{max} \cdot \lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1}} \quad (6.14)$$

Onde,

s_{lim} - espessura limite, expressa em metros;

t_{max} - tempo máximo de aquecimento ao qual o material é exposto ao fogo, obtido pela expressão 6.19 e expresso em horas.

- Se $s_1 > s_{lim}$ então,

$$b = b_1 \quad (6.15)$$

- Caso $s_1 < s_{lim}$ então,

$$b = \frac{s_1}{s_{lim}} \cdot b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{lim}}\right) \cdot b_2 \quad (6.16)$$

Onde,

Os índices 1 e 2 indicam a ordem de exposição ao fogo, sendo o índice 1 o material directamente exposto e o índice 2 o material seguinte.

s_i - espessura da camada i;

$$b_1 = \sqrt{\rho_1 \cdot c_1 \cdot \lambda_1};$$

ρ_1 - massa específica da camada i;

c_1 - calor específico da camada i;

λ_1 - condutividade térmica da camada i.

Desta forma, para considerar os diferentes materiais que constituem a envolvente (paredes, tecto e pavimento), o factor b da expressão 6.9 deve ser calculado da seguinte forma:

$$b = \left(\sum b_j \cdot A_j\right) / (A_t - A_v) \quad (6.17)$$

Onde,

A_j – área da superfície da envolvente j , excluindo as aberturas em m^2 ;

b_j – propriedade térmica da superfície da envolvente j , de acordo com as expressões 6.14 e 6.15.

Depois de consideradas as condições que caracterizam o compartimento, é necessário considerar a temperatura máxima da curva paramétrica $\theta_g(t^*)$. Sabendo que esta curva paramétrica é uma curva com um andamento exponencial e apenas descreve a fase de aquecimento, então $\theta_g(t^*)$ descreve a temperatura máxima quando $\theta_g(t^* = t_{max}^*)$.

$$t_{max}^* = t_{max} \cdot \Gamma \quad (6.18)$$

Onde,

t_{max}^* - tempo fictício máximo, expresso em horas,

t_{max} - tempo máximo de aquecimento, expresso em horas e calculado pela seguinte expressão,

$$t_{max} = \max \left\{ 0,2 \times 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{O}; t_{lim} \right\} \quad (6.19)$$

Onde,

t_{lim} – tempo limite de aquecimento, expresso em horas (apesar das tabelas 6.1 e 6.2 [2] que lhe dão origem, são expressas em minutos);

$q_{t,d}$ – valor de cálculo da densidade de carga de incêndio, expresso em MJ/m^2 ,

$$q_{t,d} = \frac{q_{f,d} \cdot A_f}{A_t} \quad , \quad 50 \leq q_{t,d} \leq 1000 \text{ MJ}/m^2 \quad (6.20)$$

Onde,

$q_{f,d}$ – densidade de carga de incêndio em MJ/m^2 , dada pela expressão 6.34, do ponto 6.2.3, onde é feita referencia à forma de obter a densidade de carga de incêndio;

A_f – área de pavimento [m^2].

Velocidade de propagação do incêndio	t_{lim}
Lenta	25 minutos
Média	20 minutos
Rápida	15 minutos

Tabela 6.1 – Tempo limite para a velocidade de propagação do incêndio.

Tipo de ocupação	Velocidade de propagação do incêndio
Habitação	Média
Hospital (quartos)	Média
Hotel (quartos)	Média
Biblioteca	Rápida
Escritório	Média
Sala de aulas em escola	Média
Centro comercial	Rápida
Teatro (cinema)	Rápida
Transportes (espaço público)	Lenta

Tabela 6.2 – Velocidade de propagação para diferentes ocupações do compartimento de incêndio.

Caso a temperatura máxima seja dada por t_{lim} , então o incêndio é identificado como sendo controlado pela carga de incêndio. Caso contrário, se t_{max} for o resultado da expressão $(0,2 \times 10^{-3} \cdot q_{t,d}/O)$, então o incêndio diz-se controlado pela ventilação.

No caso em que $t_{max} = t_{lim}$, o tempo fictício (t^*) utilizado na equação 6.5 deve ser substituído pela seguinte expressão.

$$t^* = t \cdot \Gamma_{lim} \quad (6.21)$$

Onde,

Γ_{lim} - coeficiente de expansão limite;

$$\Gamma_{lim} = (O_{lim}/b)^2 / (0,04/1160)^2; \quad (6.22)$$

Onde,

O_{lim} - factor de aberturas limite;

$$O_{lim} = 0,1 \times 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{t_{lim}} \quad (6.23)$$

Se ($O > 0,04$ e $q_{t,d} < 75$ e $b < 1160$), então ao coeficiente Γ_{lim} da expressão 6.22, é aplicado um factor multiplicativo k , com a seguinte expressão,

$$k = 1 + \left(\frac{O - 0,04}{0,04} \right) \cdot \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \cdot \left(\frac{1160 - b}{1160} \right) \quad (6.24)$$

Dando origem a,

$$\Gamma_{lim} = k \cdot [(O_{lim}/b)^2 / (0,04/1160)^2] \quad (6.25)$$

6.2.2. Fase de arrefecimento

Atingida a temperatura máxima da fase de aquecimento, dá-se a fase de arrefecimento, onde as curvas temperatura-tempo são descritas pelas seguintes expressões:

$$\theta_g = \begin{cases} \theta_{max} - 625 \cdot (t^* - t_{max}^* \cdot x) & , \text{ se } t_{max}^* \leq 0,5 \\ \theta_{max} - 250 \cdot (3 - t_{max}^* \cdot x) \cdot (t^* - t_{max}^* \cdot x) , & \text{ se } 0,5 < t_{max}^* < 2 \\ \theta_{max} - 250 \cdot (t^* - t_{max}^* \cdot x) & , \text{ se } t_{max}^* \geq 2 \end{cases} \quad (6.26)$$

Onde,

t^* – tempo fictício em horas, obtido pela a equação 6.6;

t_{max}^* – tempo fictício máximo em horas, obtido pela seguinte expressão,

$$t_{max}^* = \left(0,2 \times 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{O} \right) \cdot \Gamma \quad (6.27)$$

$$x = \begin{cases} 1 & , se t_{max} > t_{lim} \\ t_{lim} \cdot \frac{\Gamma}{t_{max}^*} & , se t_{max} < t_{lim} \end{cases} \quad (6.28)$$

Para obter a velocidade de arrefecimento, há que calcular a derivada da expressão 6.26 em ordem ao tempo. É assim possível conhecer o tempo de arrefecimento e consequentemente o tempo total do incêndio.

$$\dot{\theta}_g = \frac{d\theta_g}{dt} = \frac{d\theta_g}{dt^*} \cdot \frac{dt^*}{dt} = \frac{d\theta_g}{dt^*} \cdot \Gamma \quad (6.29)$$

Onde,

$\dot{\theta}_g$ - Velocidade de arrefecimento, em °C/h;

$$\frac{d\theta_g}{dt^*} = \begin{cases} -625 & , se t_{max}^* \leq 0,5 \\ -250 \cdot (3 - t_{max}^*) & , se 0,5 < t_{max}^* < 2 \\ -250 & , se t_{max}^* \geq 2 \end{cases} \quad (6.30)$$

Onde,

t_{max}^* - tempo fictício máximo definido pela expressão 6.27;

Γ - coeficiente de expansão, definido pela expressão 6.7.

Obtida a velocidade de arrefecimento a partir da expressão 6.30, é possível deduzir a duração da fase de arrefecimento t_{arref} . O tempo de arrefecimento é o tempo necessário para que a temperatura decresça desde o valor máximo da fase de aquecimento θ_{max} , até à temperatura de 20 °C, de acordo com a seguinte expressão:

$$\theta_{max} + \dot{\theta}_g \cdot t_{arref} = 20 \text{ °C} \quad (6.31)$$

Sendo esta reajustada em ordem do tempo de arrefecimento, obtêm-se a seguinte expressão:

$$t_{arref} = \frac{20 - \theta_{max}}{\dot{\theta}_g} \quad (6.32)$$

Onde,

t_{arref} - tempo de arrefecimento expresso em horas

A duração total de um incêndio paramétrico pode ser obtida pelo somatório dos períodos de aquecimento e arrefecimento

$$t_{TOTAL} = t_{max} + t_{arref} \quad (6.33)$$

Onde,

t_{TOTAL} – duração total do incêndio expresso em horas

6.2.3. Densidade de carga de incêndio

A quantidade de combustível existente no interior de um compartimento susceptível de alimentar um incêndio e a forma como este combustível se distribui é um factor de extrema importância no desenvolvimento de um incêndio. Surge assim o conceito de carga de incêndio ou potencial calorífico, dado pelas seguintes expressões.

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \quad (6.34)$$

Onde,

$q_{f,d}$ – valor de cálculo da densidade de carga de incêndio, expresso em MJ/m²;

$q_{f,k}$ – valor característico da densidade de carga de incêndio por área de pavimento, expresso em MJ/m² e definido na tabela 6.6;

m – factor de combustão; para materiais celulósicos (tabela 6.6) pode tomar-se o valor de $m = 0,8$, ou de forma conservativa $m = 1,0$;

δ_{q1} – factor parcial que relaciona o risco de activação do incêndio com as dimensões do compartimento, este factor pode ser obtido através da tabela 6.3;

δ_{q2} – factor parcial que relaciona o risco de activação do incêndio de acordo com o tipo de ocupação do compartimento, este factor pode ser obtido através da tabela 6.4;

δ_n – factor parcial que relaciona as diferentes medidas activas de segurança contra incêndio. Este factor é obtido de acordo com a seguinte expressão,

$$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni} \quad (6.35)$$

Onde,

δ_{ni} – factor parcial que relaciona cada medida activas de segurança contra incêndio. Cada um destes factores é obtido de acordo com a tabela 6.5,

Área em planta do compartimento, em m ²	Perigo de activação do incêndio d _{q1}
25	1,10
250	1,50
2500	1,90
5000	2,00
10000	2,13

Tabela 6.3 – factor δ_{q1} [1, 2].

Exemplos de ocupação	Perigo de activação do incêndio d _{q2}
Galerias de arte, museu, piscina	0,78
Escritórios, habitação, hotel, indústria de papel	1,00
Fabrico de motores e maquinarias	1,22
Laboratório químico, oficina de pintura	1,44
Pirotecnia, fabrico de tintas	1,66

Tabela 6.4 – factor δ_{q2} [1, 2].

Extinção automática	Sistema de extinção automática por água		δ_{n1}	0,61
	Redes suplementares independentes	0		1,0
		1	δ_{n2}	0,87
		2		0,7
Deteção automática	Deteção automática e alarme	Por calor	δ_{n3}	0,87
		Por fumo	δ_{n4}	0,73
	Transmissão automática do alarme para o corpo de bombeiros		δ_{n5}	0,87
Extinção manual	Bombeiros de empresa		δ_{n6}	0,61
	Sapadores bombeiros		δ_{n7}	0,78
	Vias de acesso seguras		δ_{n8}	0,9
				1,0
				1,5
	Meios de primeira intervenção		δ_{n9}	1,0
				1,5
	Sistemas de evacuação de fumos		δ_{n10}	1,0
				1,5

- (1) Devem estar quase sempre presentes as medidas normais que devem ser tomadas para o combate a incêndios, como sendo o bom acesso ao local, a existência de meios de primeira intervenção e sistemas de evacuação de fumos, levando a que δ_{n8} , δ_{n9} e δ_{n10} assumam o valor de 1,0 desta tabela. Caso estas medidas não sejam previstas, deve ser assumido o valor de 1,5. Em todos os outros factores δ_{ni} , se for verificada a inexistência das medidas activas indicadas na tabela, então os respectivos valores de utilização δ_{ni} devem ser majorados a 1,0.
- (2) Nos factores δ_{n8} este pode assumir o valor de 0,9 como mostra a tabela, mas apenas se as escadas forem postas sobre pressão no caso de alarme contra incêndio.

Tabela 6.5 – factores δ_{ni} em função das medidas activas de segurança contra incêndio [1, 2].

A tabela 6.5 apresenta valores para os factores referentes às medidas activas de segurança, contudo estes podem ser influenciados pelos pontos (1) e (2) da tabela referida, assumindo que foram cumpridos regulamentos para a aplicação de sprinklers, alarme e detecção, e evacuação de fumos, sendo ainda possível que circunstâncias locais venham a influenciar os valores estabelecidos na tabela 6.5.

As densidades de carga de incêndio referidas na tabela 6.6 são válidas para compartimentos usuais, compreendendo as cargas mobiliárias e área de pavimento, estando os compartimentos sujeitos a um tipo de ocupação tipo, desde que o factor δ_{n2} indicado na tabela 6.5 seja igual a 1.

Densidade de carga de incêndio $q_{f,k}$ MJ/m²		
Ocupação	Valor médio	Quantilho 80%
Habitação	780	948
Hospital (quarto)	230	280
Hotel (quarto)	310	377
Biblioteca	1500	1824
Escritório	420	511
Sala de aulas em escola	285	347
Centro comercial	600	730
Teatro (cinema)	300	365
Transportes (espaço público)	100	122

Tabela 6.6 – valores característicos de densidade de carga de incêndio por tipo de ocupação.

Em situações onde as classes de ocupação não estejam contempladas na tabela 6.6, as densidades de carga de incêndio devem ser determinadas de acordo com as condições específicas de cada compartimento, onde devem ser conhecidos os tipos de utilização do espaço, o mobiliário, os tipos de instalação, os elementos de construção, revestimentos, acabamentos e uma previsão da alteração dessas condições no tempo. É assim possível prever a densidade de carga térmica a partir das seguintes equações.

$$Q_{fi,k} = \sum M_{k,i} \cdot H_{ui} \cdot \psi_i \quad (6.35)$$

Onde,

$Q_{fi,k}$ – valor característico da carga de incêndio, expresso em MJ;

$M_{k,i}$ – massa de material combustível expressa em kg. Representa as cargas permanentes expectáveis de não variar ao longo do período de utilização da estrutura. Para que o material combustível no interior do compartimento que possa variar ao longo do tempo de utilização seja considerado como carga de incêndio, deve ser representado por valores que previsivelmente não venham a ser ultrapassados durante 80% do tempo;

H_{ui} – valor calorífico efectivo expresso em MJ/kg e calculado segundo a expressão 6.37 ou tabela 6.7;

ψ_i – factor opcional para avaliar as cargas de incêndio protegidas.

As cargas de incêndio necessitam de ser consideradas em todos os compartimentos, ficando apenas de parte os espaços confinados que tenham sido concebidos para resistir à exposição ao fogo.

Segundo Schleich (2001), o valor de $\psi_i=1,0$ é um valor realista para a maioria das situações. Contudo quando as cargas de incêndio juntamente com as cargas de incêndio não protegidas não forem suficiente para atingir a temperatura de ignição das restantes cargas de incêndio, então ψ_i pode assumir o valor de $\psi_i= 0$. As cargas de incêndio protegidas em espaços não confinados e não combustíveis que não sejam dimensionados em relação à acção do fogo mas que se mantenham intactos à sua exposição, podem ser calculados, considerando a maior carga de incêndio e no mínimo 10% das cargas de incêndio não protegidas associadas a valores de $\psi_i=1,0$.

$$q_{f,k} = Q_{fi,k}/A \quad (6.36)$$

Onde,

A - área de pavimento do compartimento de incêndio.

$$H_u = H_{u0} \cdot (1 - 0,01 \cdot u) - 0,025 \cdot u \quad (6.37)$$

Onde,

H_u - poder calorífico efectivo, expresso em MJ/kg;

H_{u0} - poder calorífico efectivo dos materiais secos, expresso em MJ/kg;

u - teor de humidade expresso em % do peso do material seco.

Poder calorífico efectivo H_u	
Sólidos	MJ/kg
Madeira	17,5
Outros materiais celulósicos (Vestuário, Cortiça, Algodão, Papel, Cartão, Seda, Palha, Lã)	20
Carbono (Antracite, Carvão de Lenha, Carvão)	30
Químicos	
Parafinas (Metano, Etano, Propano, Butano)	50
Olefinas (Etileno, Propileno, Buteno)	45
Aromáticos (Benzeno, Tolueno)	40
Álcoois (Metanol, Etanol, Álcool Etilico)	30
Combustíveis (Gasolina, Petróleo, Gasóleo)	45
Plásticos hidrocarbonetos puros (Polietileno, Polistireno, Polipropileno)	40
Outros produtos	
ABS (plástico)	35
Poliéster (plástico)	30
Poliisocianurato e poliuretano (plástico)	25
Cloreto Polivinílico, PVC (plástico)	20
Betume, Asfalto	40
Cabedal	20
Linóleo	20
Borracha de Pneu	30

Tabela 6.7 – poder calorífico efectivo H_u de materiais combustíveis para cálculo das cargas de incêndio.

O poder calorífico efectivo de cada material combustível é a quantidade de calor que 1kg de material combustível liberta durante uma combustão completa. Em geral, 1kg de madeira liberta entre 17 a 20 MJ. Contudo existem ligeiras diferenças entre normas e regulamentos: a tabela 6.7, na Parte 2 do Eurocódigo 1 [2], propõe o poder calorífico da madeira de 17,5 MJ/kg, mas o despacho n.º 2074/2009 [12], legislação complementar ao Decreto-Lei 220/2008 [10], propõe o poder calorífico da madeira (H_i) como sendo de 16,7 MJ/kg

6.2.4. Exemplo de curvas paramétricas

Como foi referido anteriormente neste capítulo, a densidade de carga de incêndio e as condições de arejamento são algumas das condições importantes que influenciam o incêndio. Em seguida será feita a comparação de diferentes condições de abertura e de densidade de carga de incêndio para o mesmo compartimento, mostrando a importância das mesmas no aumento da temperatura no interior de um compartimento sujeito a incêndio.

6.2.4.1. Curvas paramétricas com variação dos factores de aberturas

O desenvolvimento e a posterior propagação de um incêndio é um processo onde é imprescindível a presença de combustível e comburente, estando o combustível presente no interior do compartimento e sendo o oxigénio o comburente que alimenta a combustão e cuja entrada é limitada pela ventilação do compartimento.

As curvas paramétricas permitem avaliar a importância da ventilação durante o desenvolvimento e propagação de um incêndio, sob a forma de curvas temperatura-tempo, tal como demonstra o gráfico 6.9.

Para esta análise foi elaborado o gráfico 6.9, onde foi variando com 10 factores de abertura (O) obtido a partir da equação 6.9. O factor de abertura tal como referido na Parte 1-2 do Eurocódigo 1 [2], variou de $0,02 m^{1/2}$ a $0,20 m^{1/2}$. Todos os outros factores que influenciam a equação 6.5 foram tidos como constantes, com os seguintes valores:

- Densidade de carga de incêndio de $q_{f,d} = 1000 MJ/m^2$.
- Inércia térmica das paredes de $b = 1600 J/m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K$.
- Área total da superfície da envolvente de $A_t = 350 m^2$.
- Área de pavimento de $A_f = 95 m^2$.
- Velocidade de propagação de incêndio lenta, com $t_{lim} = 25 minutos$.

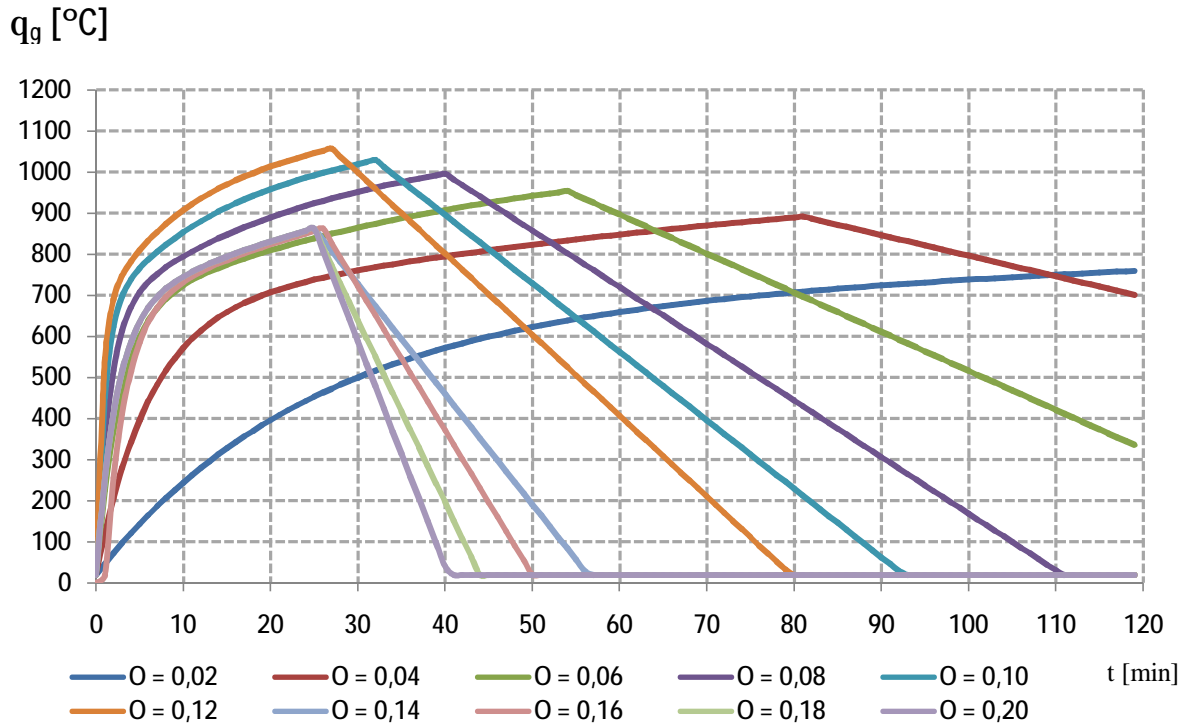


Gráfico 6.9 – Evolução de temperatura - tempo, variando o factor de abertura.

No gráfico 6.9, é possível verificar, para um factor de aberturas desde $O = 0,02 \text{ m}^{1/2}$ até $O = 0,12 \text{ m}^{1/2}$ (incêndio limitado pela ventilação), que o aumento das aberturas vai propiciar um incêndio cada vez mais severo, com temperaturas mais elevadas e com menor duração. Um incêndio com um factor de aberturas elevado (limitado pela carga de incêndio) torna-se mais curto e menos severo, provocado pelo arrefecimento por aumento de ventilação, como é possível verificar no intervalo de aberturas desde $O = 0,14 \text{ m}^{1/2}$ até $O = 0,20 \text{ m}^{1/2}$, onde a fase crescente termina em $t = t_{lim} = 25 \text{ minutos}$ e a fase de arrefecimento é cada vez mais curta, diminuindo com o aumento do factor de aberturas.

6.2.4.2. Curvas paramétricas com variação dos valores de cálculo da densidade de carga de incêndio

O gráfico 6.10, foi obtido com 10 valores diferentes de densidades de carga de incêndio ($q_{f,d}$) obtida a partir da expressão 6.34. O valor de cálculo da carga de incêndio variou

entre 200 MJ/m^2 e 2000 MJ/m^2 , sendo todos os outros factores que influenciam a equação 6.5 tidos como constantes, com os seguintes valores:

- Factor de aberturas de $O = 0,08 \text{ m}^{1/2}$.
- Inércia térmica das paredes de $b = 1600 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}$.
- Área total da superfície da envolvente de $A_t = 350 \text{ m}^2$.
- Área de pavimento de $A_f = 95 \text{ m}^2$.
- Velocidade de propagação de incêndio lenta, com $t_{lim} = 25 \text{ minutos}$.

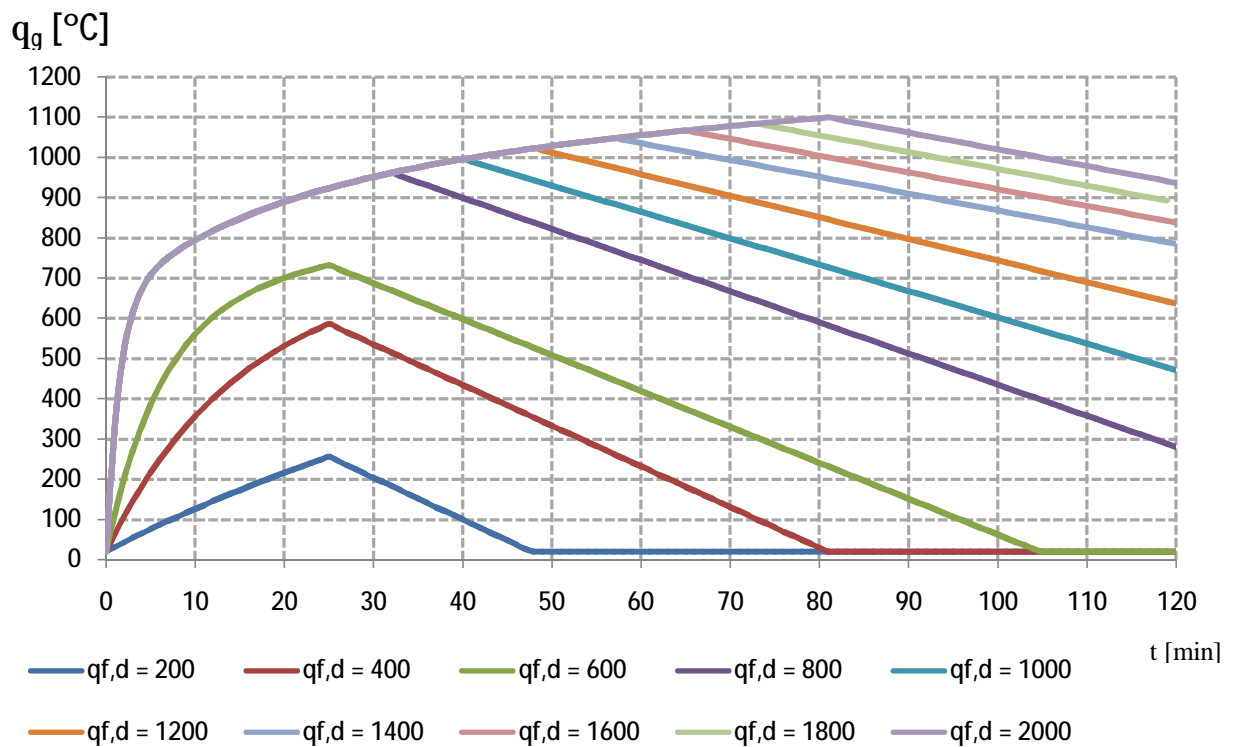


Gráfico 6.10 – Evolução de temperatura - tempo, variando a densidade de carga de incêndio.

Ao contrário do gráfico 6.9 onde foi analisada a influência das aberturas, o gráfico 6.10 é mais intuitivo. Sendo nele utilizado um factor de aberturas que limita o incêndio pela ventilação, o aumento progressivo da densidade de carga térmica vai propiciar um incêndio cada vez mais severo, atingindo temperaturas mais elevadas e cada vez mais demorado.

6.3. Outras propostas de análise

Sendo a evolução de temperatura de um incêndio real difícil de definir dadas as variadíssimas condições que o caracterizam, as aproximações propostas tanto pelas curvas nominais como curvas paramétrica são frequentemente adaptadas. Contudo, essas curvas padecem de várias limitações. As nominais não consideram a densidade de carga de incêndio nem a morfologia do compartimento. Já as paramétricas, apesar de envolverem inúmeras condicionantes, como a densidade de carga de incêndio, áreas de aberturas do compartimento, áreas de superfícies envolventes do compartimento, as respectivas condutividades térmicas com o exterior e as fases de arrefecimento, à semelhança das curvas nominais, também as paramétricas apenas consideram a fase de pós-flashover.

Dessa forma, existindo a necessidade de conhecer melhor a evolução da temperatura dos gases provocada por um incêndio no interior de um compartimento, foram criados nos Estados Unidos da América organismos especializados em protecção contra incêndio onde organizações como a NFPA (National Fire Protection Association) em Quincy, Massachusetts e a SFPE (Society of Fire Protection Engineers) [20] em Bethesda, Maryland que promovem o desenvolvimento de uma análise adequada da evolução do incêndio.

Para essa análise a SFPE e NFPA propõem vários métodos de análise de evolução de temperatura no interior de um compartimento, Contudo estes métodos são complexos e divididos pelas previsões de ponto de flashover, pré-flashover e pós-flashover. Estes métodos são de diversos tipos, permitindo prever o momento em que se dá o flashover. Por exemplo, nos métodos de Babrauskas ou McCaffrey, Quintiere e Harkleroad admite-se que, partindo da temperatura ambiente à qual se dá a ignição, o flashover ocorre quando a camada superior dos gases quentes no compartimento atinge uma variação de temperatura de 500° K.

A previsão da curva de pré-flashover pode ser obtida segundo variadíssimos métodos, entre os quais o método de McCaffrey, Quintiere e Harkleroad, o método de Beyler e Deal. Apesar de propostas de equações diferentes, todas elas apresentam resultados muito aproximados.

Contudo, a previsão do comportamento de pós-flashover num compartimento é um fenómeno muito mais complexo. Apesar disso, existem algumas propostas para descrever esta fase, como o método de Babrauskas ou o método sueco que se baseia na semelhança com resultados obtidos em laboratório.

Devido à complexidade destes métodos, os mesmos não serão abordados neste trabalho.

6.4. Simulação computacional

Devido à complexidade dos vários métodos anteriormente referidos e às variadíssimas combinações possíveis para cada incêndio, é frequente o recurso a programas de cálculo automáticos, onde modelos físicos de compartimentos no decurso de um incêndio são analisados segundo modelos numéricos.

Para a realização deste trabalho, como não é possível de obter curvas de evolução de temperatura-tempo referentes a incêndios em compartimentos para comparar com as curvas nominais e paramétricas, será utilizado o programa de cálculo automático CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) desenvolvido pelo National Institute of Standards and Technology (NIST).

7. Análise de simulação computacional

A complexidade dum incêndio com todas as suas condicionantes torna difícil a previsão do comportamento do edifício e dos elementos que o compõem quando sujeitos ao fogo. Como tal, devido à carência de dados e por ser incomportável a nível económico a construção *a priori* de modelos que simulem cada edifício, é frequente o recurso a programas de cálculo automático que permite simular um incêndio num compartimento de forma tão correcta quanto possível, onde a análise, de cálculo é feita de acordo com dados obtidos em laboratório.

Para analisar curvas de evolução temperatura-tempo que simulem incêndios “reais” em compartimentos e sejam comparadas com as curvas nominais e paramétricas, será utilizado o programa de cálculo automático CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) desenvolvido pelo National Institute of Standards and Technology (NIST).

7.1. Modelo de cálculo

Para a simulação de um incêndio “real” foi idealizada uma habitação unifamiliar, como mostra a figura 7.1, onde eclodiu um incêndio sem que tenha ocorrido nenhuma intervenção para a sua extinção.

Assume-se que o incêndio deflagrou na divisão denominada por sala, sendo a descuidada utilização da lareira sem qualquer supervisão dos utilizadores deste espaço como sendo a origem da sua eclosão e rápida propagação aos materiais combustíveis existentes na região envolvente.

Para analisar o desenvolvimento e a propagação do incêndio no interior do compartimento, foi admitido o recheio convencional para uma habitação, estabelecida a sua densidade de carga térmica e mantida constante, apenas sendo alteradas as aberturas que eventualmente podem estar disponíveis para algumas situações de normal utilização da habitação.

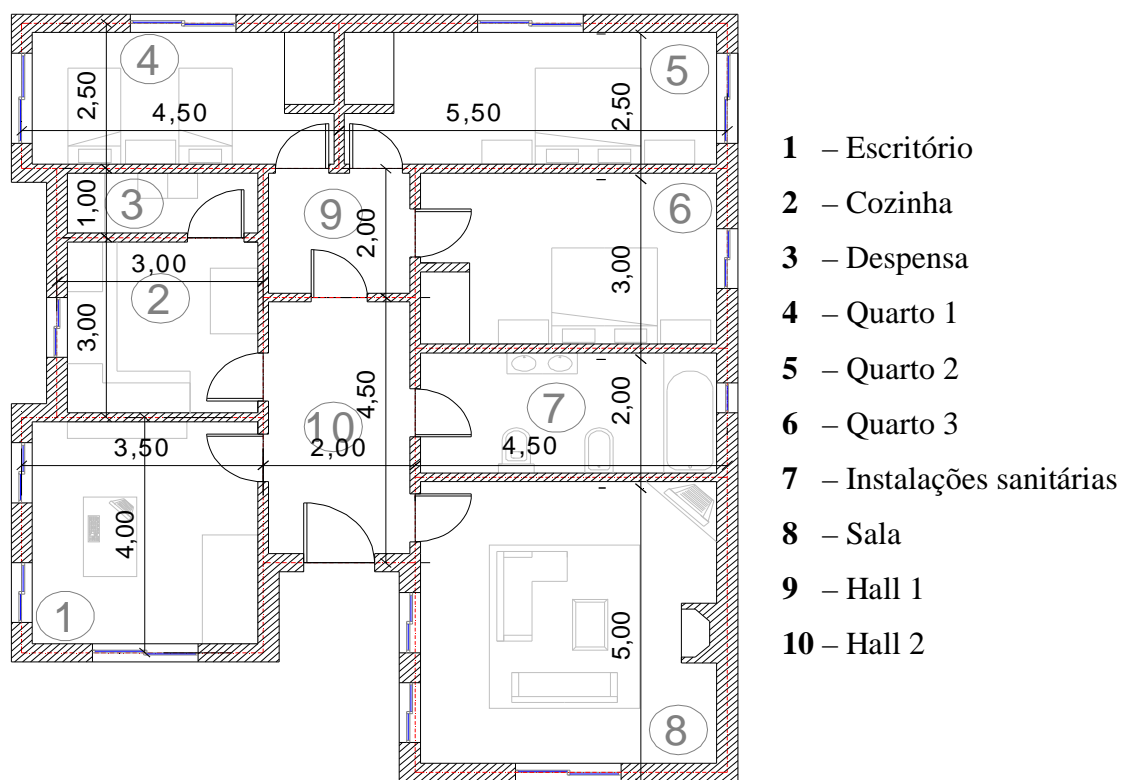


Figura 7.1 – Planta de habitação unifamiliar onde decorre o incêndio.

No que diz respeito a áreas de pavimento e de aberturas, o compartimento apresenta as características descritas a tabela 7.1, sendo as portas de acesso entre compartimentos contempladas como aberturas interiores e as janelas e a única porta de acesso ao exterior como aberturas exteriores.

	Divisão	Área de pavimento [m ²]	Área de aberturas exteriores [m ²]
1	Escritório	11.90	3.50
2	Cozinha	7.80	1.00
3	Dispensa	2.76	-
4	Quarto 1	9.36	2.50
5	Quarto 2	11.56	2.50
6	Quarto 3	11.92	1.00
7	Instalações sanitárias	8.46	-
8	Sala	19.8	3.50
9	Hall 1	4.23	-
10	Hall 2	8.85	2.00

Tabela 7.1 – Área de pavimento e aberturas em cada compartimento.

7.2. Modelação com CFAST

Para a simulação do incêndio virtual, foi necessário modelar a planta da habitação descrita na figura 7.1 de forma tão fidedigna quanto possível no que se refere a áreas, a revestimentos de cada compartimento, a aberturas entre compartimentos e para o exterior, assim como a disposição da carga de incêndio, tal como descrevem as figuras 7.2 e 7.3.

Como se pode observar nessas figuras, em cada compartimento estão marcados pontos de controlo onde é possível encontrar a temperatura a cotas pretendidas, vulgarmente na zona superior das portas e janelas. A carga de incêndio no interior de cada compartimento corresponde ao indicado na figura 7.1. Para que o meio exterior não fosse mais uma variável a interferir na ventilação, todo o estudo foi realizado assumindo que o compartimento não sofre qualquer solicitação do vento, pois a influência de vento vai variar as condições de ventilação dos compartimentos.

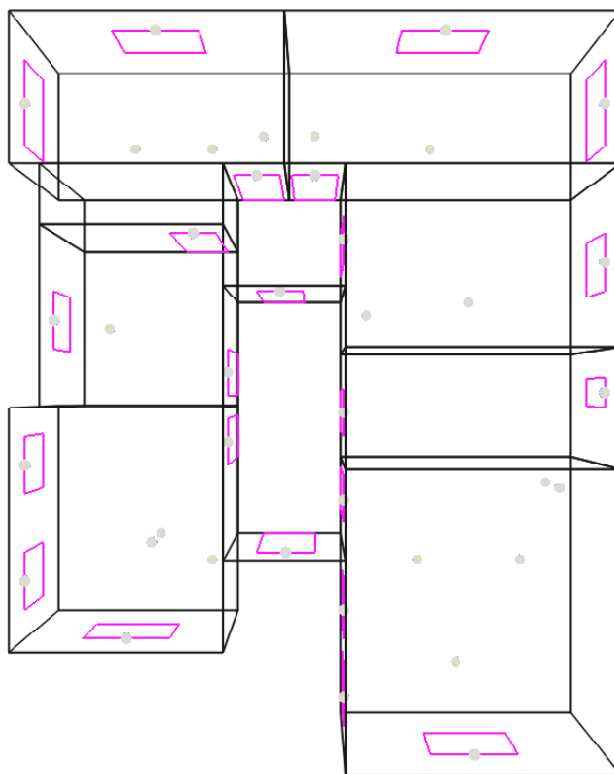


Figura 7.2 – Vista superior do modelo de CFAST.

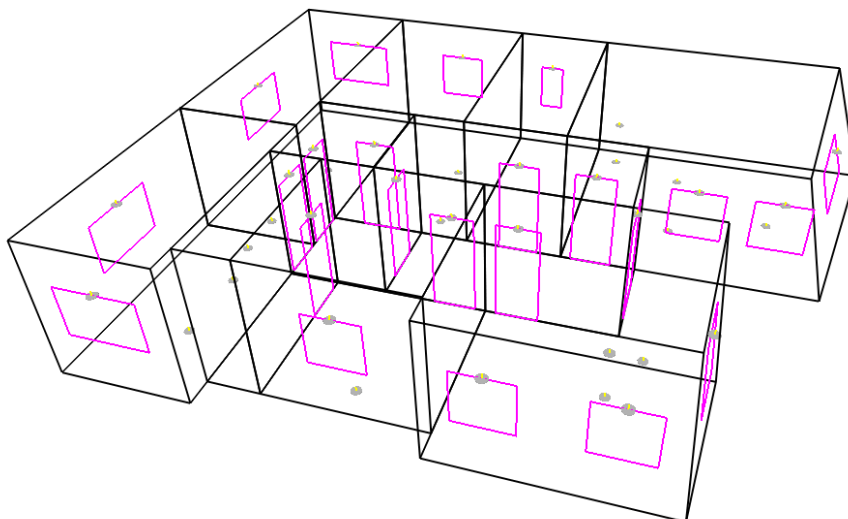


Figura 7.3 – Vista em perspectiva do modelo de CFAST.

Este software de cálculo numérico para a realização de modelo de “incêndio real” utiliza a curva de evolução temperatura-tempo para vários tipos de mobiliário com diferentes cargas de incêndio e com dados obtidos em laboratório para a construção de cada curva.

No modelo de simulação computacional, a densidade de carga térmica definida para cada compartimento é a estabelecida na tabela 7.2 e as características dos revestimentos interiores de cada compartimento estão definidas na tabela 7.3.

	Compartimento	Descrição	Carga térmica [MJ]
1	Escritório	Secretária, sofá, computador e cortinas	6869.6
2	Cozinha	Móvel de cozinha e cortinas	18900
3	Dispensa	-	-
4	Quarto 1	Camas, roupeiro e cortinas	8088
5	Quarto 2	Cama, roupeiro e cortinas	5820
6	Quarto 3	Cama, roupeiro e cortinas	5524
7	Instalações sanitárias	-	-
8	Sala	Sofás, armário, televisão e cortinas	10496.2
9	Hall 1	-	-
10	Hall 2	-	-

Tabela 7.2 – Carga térmica por cada compartimento.

Compartimento	Paredes		Tecto		Pavimento	
	Material	Esp. [m]	Material	Esp. [m]	Material	Esp. [m]
Escritório	Gesso cartonado	0.016	Gesso cartonado	0.016	Tacos de madeira	0.013
Cozinha	Azulejo	0.012	Gesso cartonado	0.012	Ladrilho	0.012
Dispensa	Gesso cartonado	0.016	Gesso cartonado	0.016	Ladrilho	0.012
Quarto 1	Gesso cartonado	0.016	Gesso cartonado	0.016	Tacos de madeira	0.013
Quarto 2	Gesso cartonado	0.016	Gesso cartonado	0.016	Tacos de madeira	0.013
Quarto 3	Gesso cartonado	0.016	Gesso cartonado	0.016	Tacos de madeira	0.013
Instalações sanitárias	Azulejo	0.012	Gesso cartonado	0.016	Ladrilho	0.012
Sala	Gesso cartonado	0.016	Gesso cartonado	0.016	Tacos de madeira	0.013
Hall 1	Gesso cartonado	0.016	Gesso cartonado	0.016	Tacos de madeira	0.013
Hall 2	Gesso cartonado	0.016	Gesso cartonado	0.016	Tacos de madeira	0.013

Tabela 7.3 – Revestimento de cada compartimento.

7.3. Condições de aberturas

Como é de prever, mesmo sendo a quantidade de aberturas a única condicionante para este trabalho, as combinações possíveis são imensas, desde portas abertas, fechadas ou parcialmente abertas, a janelas abertas, fechadas, parcialmente abertas, e ainda envidraçados que cedem a dada altura devido ao aumento de temperatura dos gases interiores. Como tal, para a realização deste trabalho apenas foram tomadas as seguintes opções de modelos de aberturas:

- Modelo de aberturas 1 – Porta com o exterior encerrada, envidraçados encerrados e portas abertas entre divisões;

- Modelo de aberturas 2 – Porta com o exterior encerrada, envidraçados abertos e portas abertas entre divisões;
- Modelo de aberturas 3 – Porta com o exterior encerrada, envidraçados encerrados à exceção do compartimento 4, 5 e 8, portas abertas entre divisões, à exceção dos compartimentos 6 e 7;
- Modelo de aberturas 4 – Porta com o exterior encerrada, envidraçados encerrados, portas abertas entre as divisões 2, 3, 8 e 10;
- Modelo de aberturas 5 – Porta com o exterior encerrada, envidraçados encerrados à exceção de um envidraçado no compartimento 8, portas fechadas entre divisões;
- Modelo de aberturas 6 – modelo de aberturas 5, com aumento gradual da ventilação.

7.3.1. Modelo de aberturas 1

Para o ensaio deste modelo a porta com o exterior encontra-se encerrada, envidraçados encerrados e portas abertas entre divisões, tal como descreve a figura 7.4.

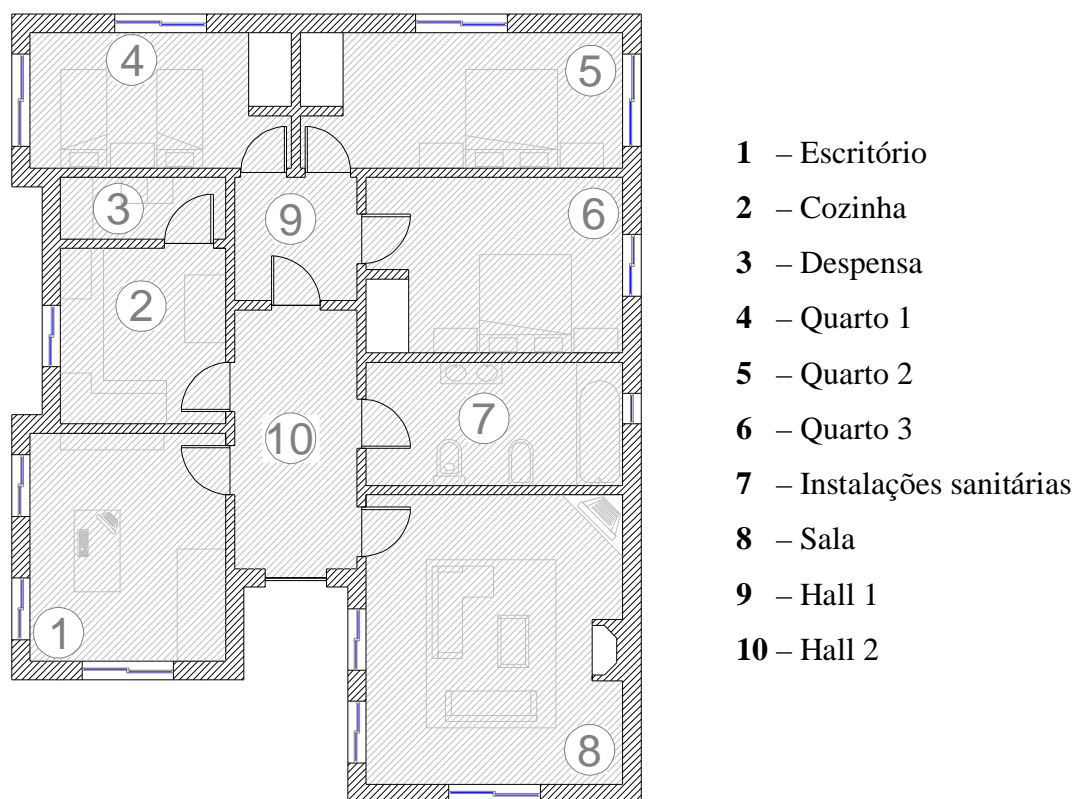


Figura 7.4 – Modelo de aberturas 1.

Este modelo descreve uma situação de incêndio com fraca ventilação, provavelmente a mais adequada para esta situação, pois em necessidade de recurso a uma lareira como fonte de aquecimento de uma habitação, vulgarmente as aberturas com o exterior seriam seladas.

Este modelo em estudo segundo o método de cálculo do software utilizado, vai dar origem ao desenvolvimento de incêndio esquematizado na figura 7.5.

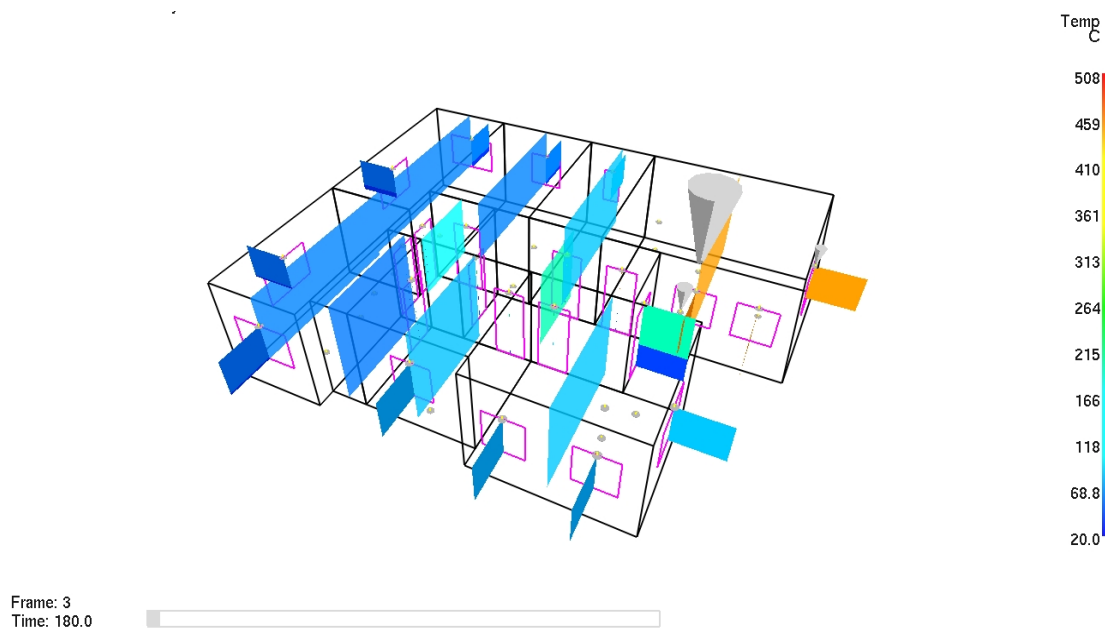


Figura 7.5 – Modelo de aberturas 1 – cálculo numérico.

Sendo a evolução de um incêndio variável ao longo do tempo, a figura 7.5 é apenas uma demonstração da evolução do incêndio, onde se pode ver que apesar de o incêndio decorrer na “sala”, com a sua eclosão numa cadeira e a propagação para o mobiliário na sua proximidade, a produção dos gases quentes deste foco de incêndio vai afectar a temperatura da camada superior dos gases nos restantes compartimentos.

Para melhor compreender o desenvolvimento deste foco de incêndio e a evolução da temperatura ao longo do tempo, o gráfico 7.1 descreve a evolução da temperatura da camada superior de gases quentes no compartimento de eclosão e a sua influência nos restantes compartimentos.

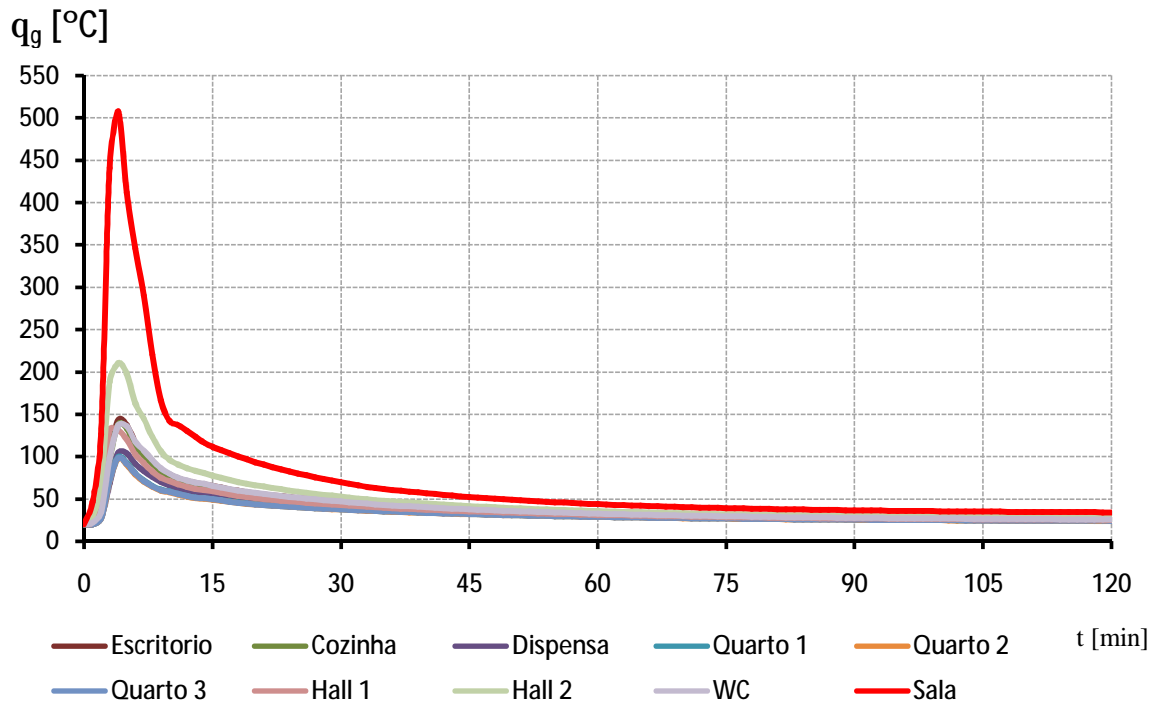


Gráfico 7.1 – Evolução da temperatura no modelo de aberturas 1.

Do gráfico 7.1 é possível concluir que a propagação do incêndio para os restantes compartimentos nesta situação de incêndio não foi muito significativa. De facto, nem toda a carga de incêndio do compartimento de eclosão chegou a ser consumida, atingindo a temperatura de 508 °C e as temperaturas atingidas nos restantes compartimentos não excederam o pico máximo de 211 °C (temperatura atingida no hall 2).

7.3.2. Modelo de aberturas 2

Para o ensaio deste modelo, e tendo em conta os resultados obtidos anteriormente, a abordagem foi ligeiramente diferente, onde tal como descreve a figura 7.6, a porta com o exterior mantêm-se encerrada, as portas interiores mantêm-se abertas, mas os envidraçados encontram-se com a sua abertura máxima em todas as divisões.

Este modelo descreve uma situação de incêndio com grande ventilação. É o modelo mais desadequado para uma situação onde seja necessidade recorrer a uma lareira como fonte de aquecimento de uma habitação (situação na estação de inverno), mas

considerando qualquer outra fonte de ignição para uma situação na estação de verão, com as aberturas para o exterior abertas, corresponde a um cenário possível.

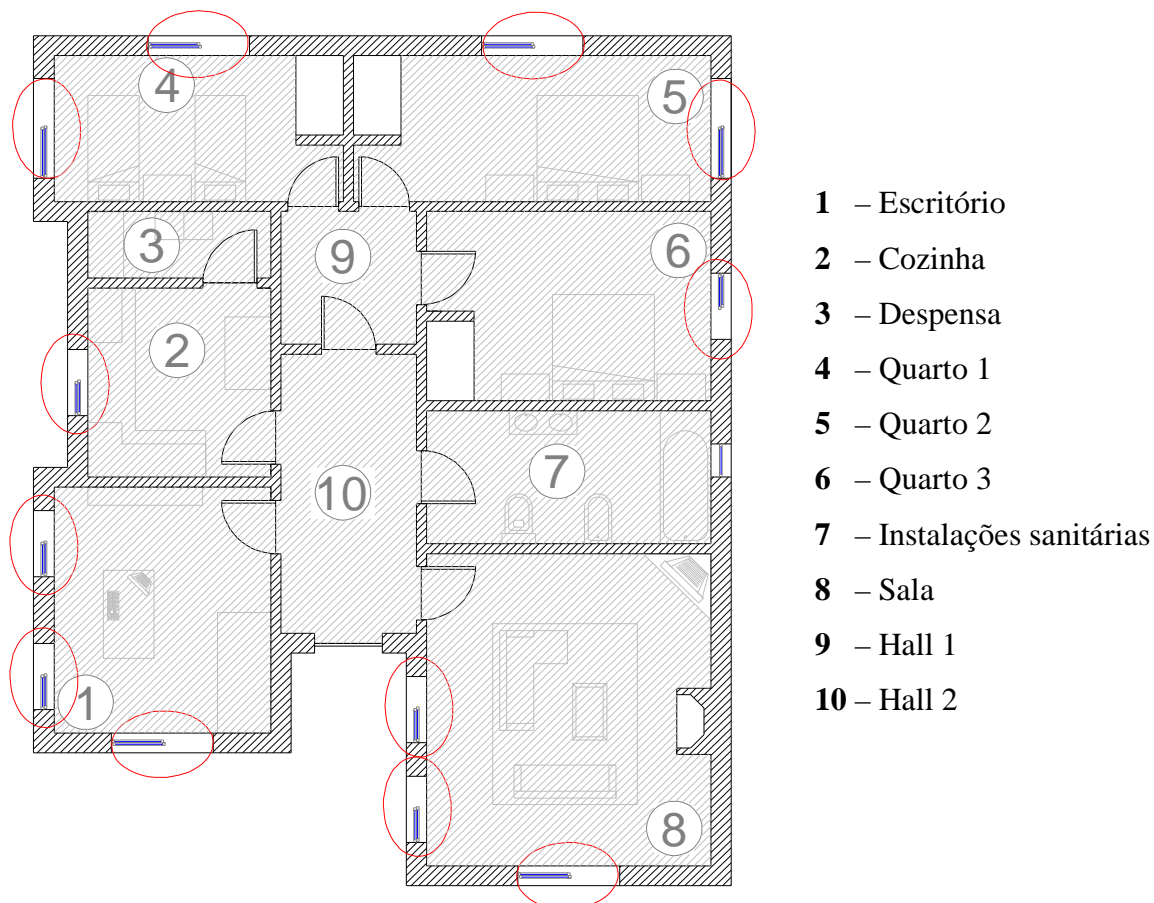


Figura 7.6 – Modelo de aberturas 2.

Este modelo em estudo segundo o método de cálculo do software utilizado, vai dar origem ao desenvolvimento de incêndio representado na figura 7.7.

Tal como no modelo anterior a evolução do incêndio ao longo do tempo descrita na figura 7.7 é apenas uma demonstração da evolução do incêndio, podendo-se observar que, apesar de o incêndio decorrer na “sala”, com a sua eclosão numa cadeira e propagação para o mobiliário na sua proximidade, a produção dos gases quentes deste foco de incêndio vai afectar a temperatura da camada superior dos gases nos restantes compartimentos.

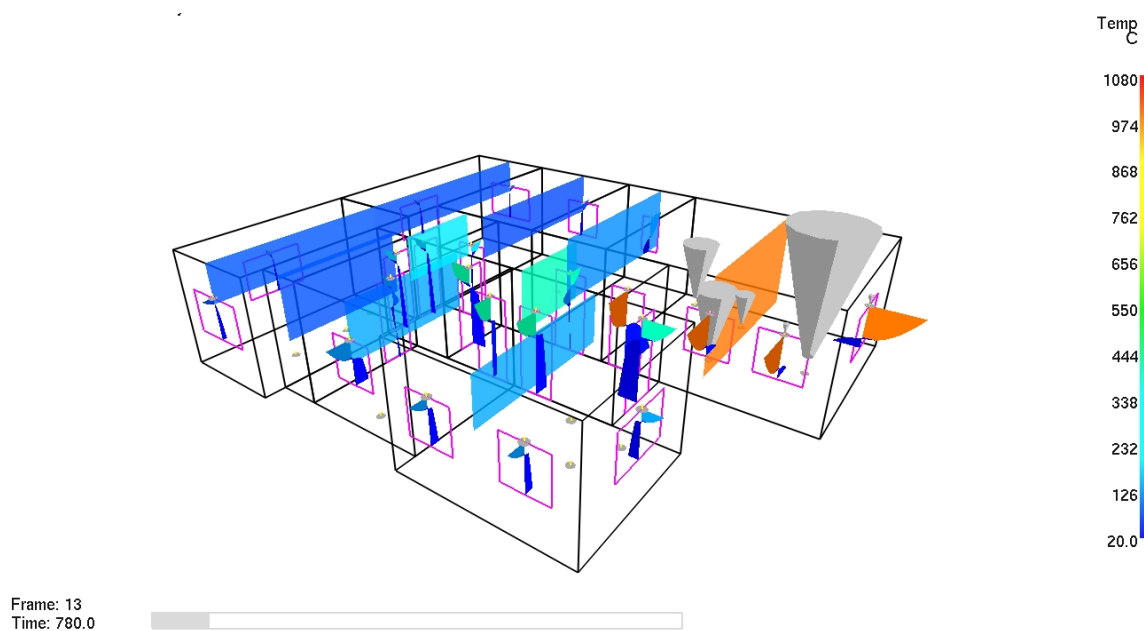


Figura 7.7 – Modelo de aberturas 2 – cálculo numérico.

Para melhor compreender o desenvolvimento deste foco de incêndio e a evolução da temperatura ao longo do tempo, o gráfico 7.2 descreve a evolução da temperatura da camada superior de gases quentes no compartimento de eclosão e a sua influência nos restantes compartimentos.

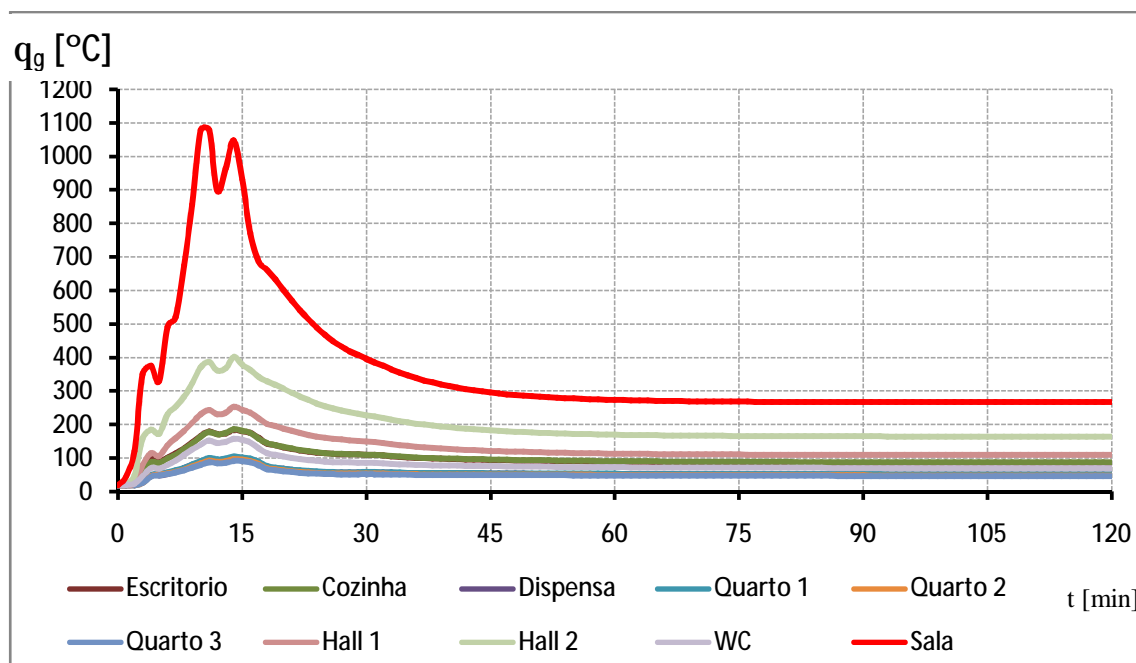


Gráfico 7.2 – Evolução da temperatura no modelo de aberturas 2.

Do gráfico 7.2 é possível concluir que a propagação do incêndio para os restantes compartimentos nesta situação de incêndio não foi muito significativa apesar do aumento da ventilação. Este facto pode ter origem na carência de combustível nos compartimentos, pois nem toda a carga de incêndio do compartimento de eclosão chegou a ser consumida (atingindo a temperatura de 1080 °C) e as temperaturas atingidas nos compartimentos adjacentes como o escritório (compartimento mais próximo com carga de incêndio mais elevada) não excederam o pico máximo de 185 °C.

7.3.3. Modelo de aberturas 3

Para o ensaio deste modelo, como se representa na figura 7.8, a porta com o exterior mantém-se encerrada, as portas interiores mantêm-se abertas à excepção dos compartimentos 6 e 7, mas os envidraçados encontram-se encerrados em todos os compartimentos à excepção dos compartimentos 4, 5 e 8.

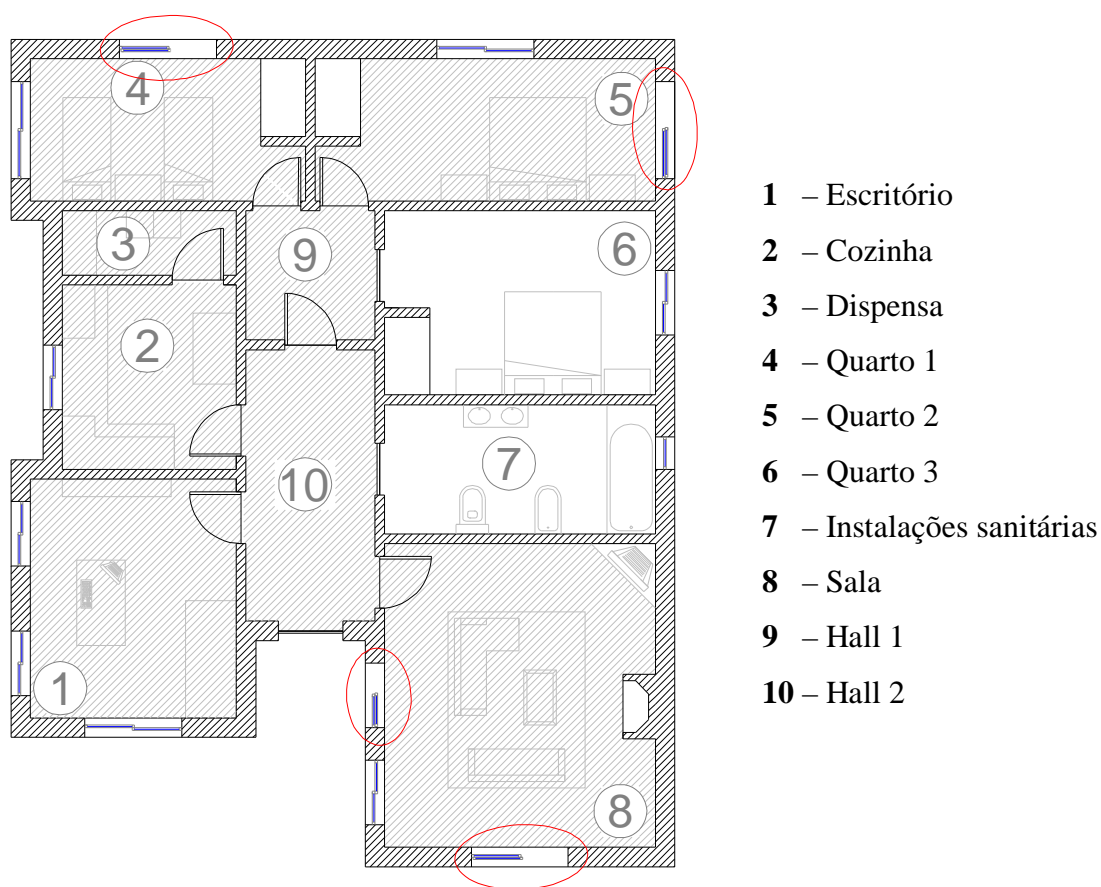


Figura 7.8 – Modelo de aberturas 3.

Este modelo em estudo, segundo o método de cálculo do software utilizado, vai dar origem ao seguinte desenvolvimento de incêndio representado na figura 7.9.

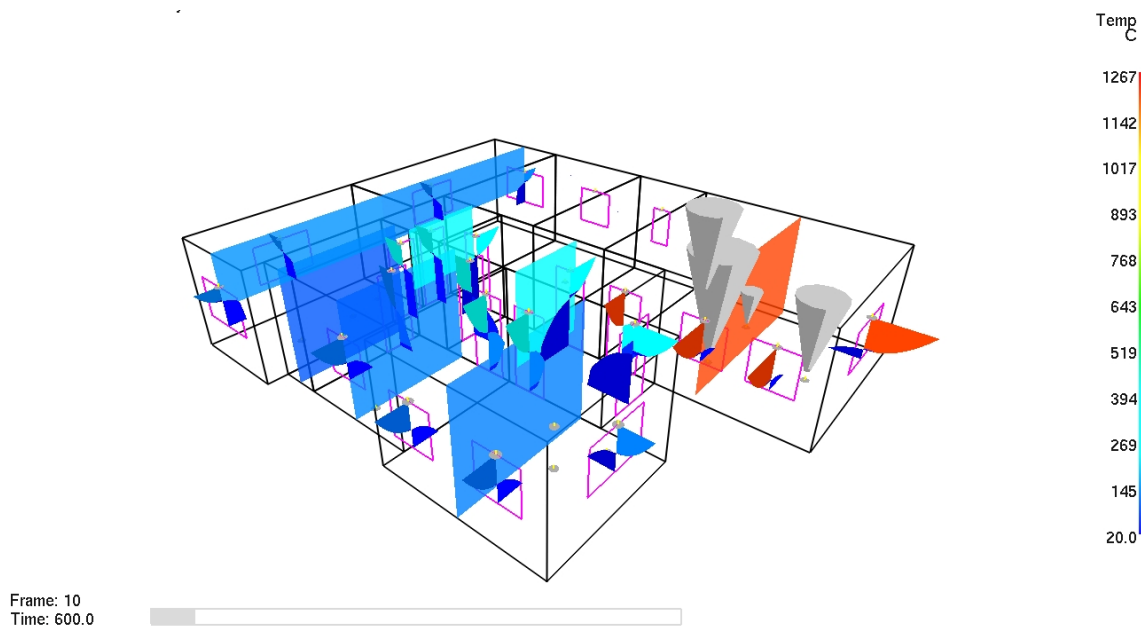


Figura 7.9 – Modelo de aberturas 3 – cálculo numérico.

Este modelo de aberturas foi realizado com o objectivo de não apresentar situações extremas de total aberturas ou de total encerramento de aberturas, tal como sucede nos modelos anteriores. É ainda limitado o número de compartimentos que podem influenciar a evolução do incêndio na habitação, neste caso o Quarto 3.

Observando a evolução do incêndio ao longo do tempo descrita na figura 7.9, pode constatar-se que, apesar de o incêndio decorrer na “sala”, com a sua eclosão numa cadeira e propagação para o mobiliário na sua proximidade, a produção dos gases quentes deste foco de incêndio vai afectar a temperatura da camada superior dos gases nos restantes compartimentos.

Para melhor compreender o desenvolvimento deste foco de incêndio e a evolução da temperatura ao longo do tempo, o gráfico 7.3 descreve a evolução da temperatura da camada superior de gases quentes no compartimento de eclosão e a sua influência nos restantes compartimentos.

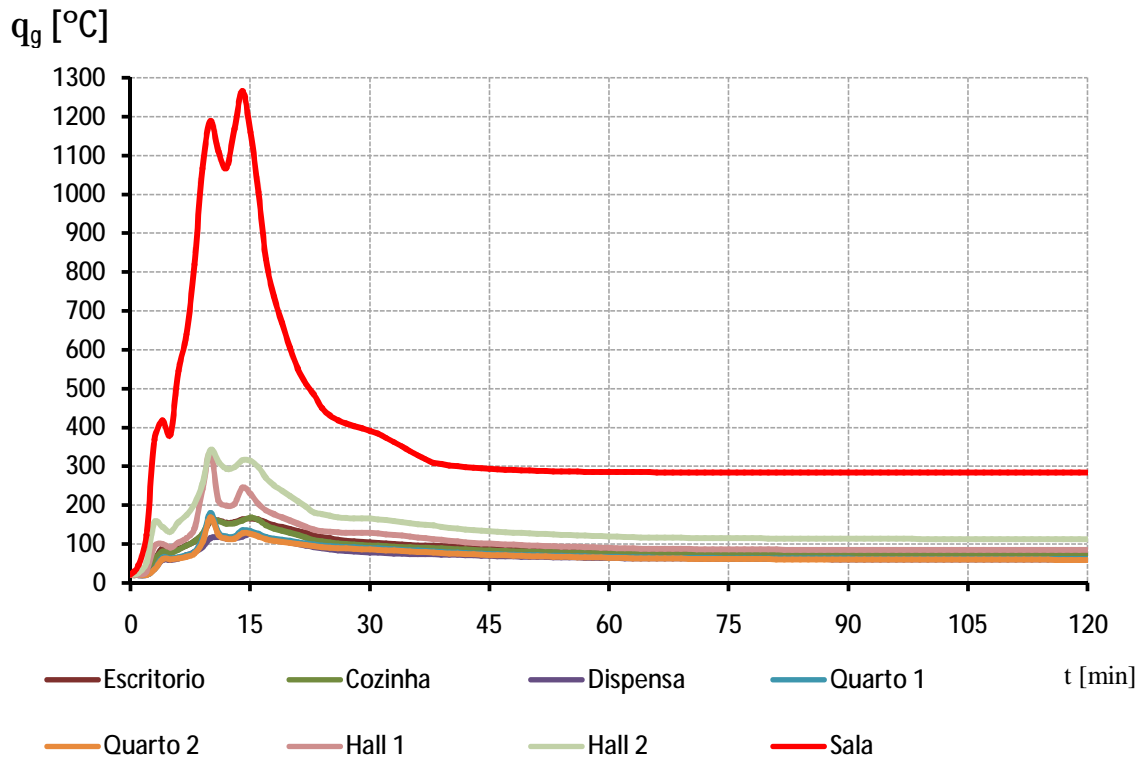


Gráfico 7.3 – Evolução da temperatura no modelo de aberturas 3.

Comparando o gráfico 7.3 com os gráficos 7.1 e 7.2 obtidos dos métodos anteriores, é possível de compreender que neste caso a propagação do incêndio para os restantes compartimentos é uma situação intermédia de severidade de incêndio. Este facto pode ter origem na variação da ventilação. O incêndio atinge temperaturas mais severas no compartimento de eclosão do incêndio, onde é atingida a temperatura de 1267 °C, ligeiramente mais elevada do que a temperatura obtida no método anterior, mas as temperaturas atingidas nos restantes compartimentos adjacentes como o escritório (compartimento mais próximo com carga de incêndio mais elevada), diminuem ligeiramente, não excedendo o pico máximo de 166 °C.

7.3.4. Modelo de aberturas 4

Para o ensaio deste modelo, e tendo em conta os resultados obtidos, a abordagem foi ligeiramente diferente do método proposto no modelo 1. Assim, tal como descreve a figura 7.10, a porta com o exterior mantém-se encerrada, as portas interiores mantêm-se

encerradas à exceção dos compartimentos 2, 3, 8 e 10, encontrando-se os envidraçados encontram-se encerrados em todos os compartimentos.

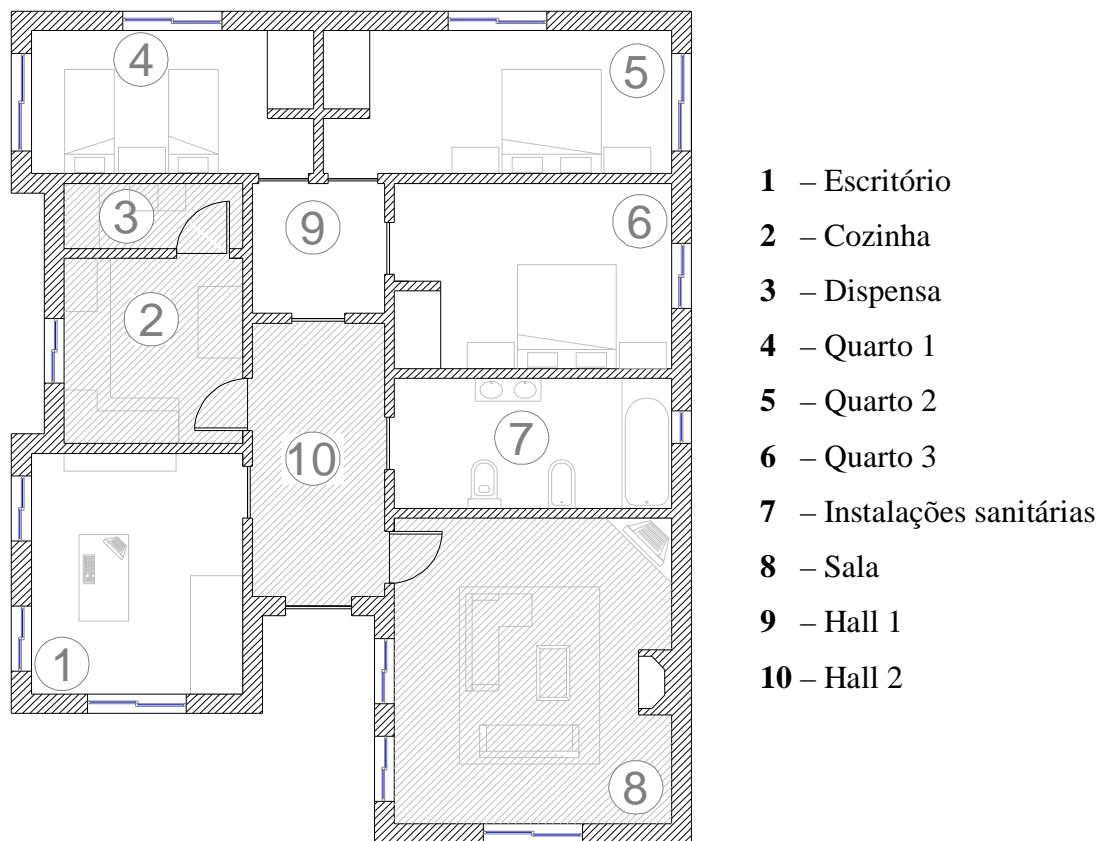


Figura 7.10 – Modelo de aberturas 4.

Este modelo em estudo, segundo o método de cálculo do software utilizado, vai dar origem ao desenvolvimento de incêndio representado na figura 7.11.

Para melhor compreender o desenvolvimento deste foco de incêndio e a evolução da temperatura ao longo do tempo, o gráfico 7.4 descreve a evolução da temperatura da camada superior de gases quentes no compartimento de eclosão do incêndio e a sua influência nos restantes compartimentos.

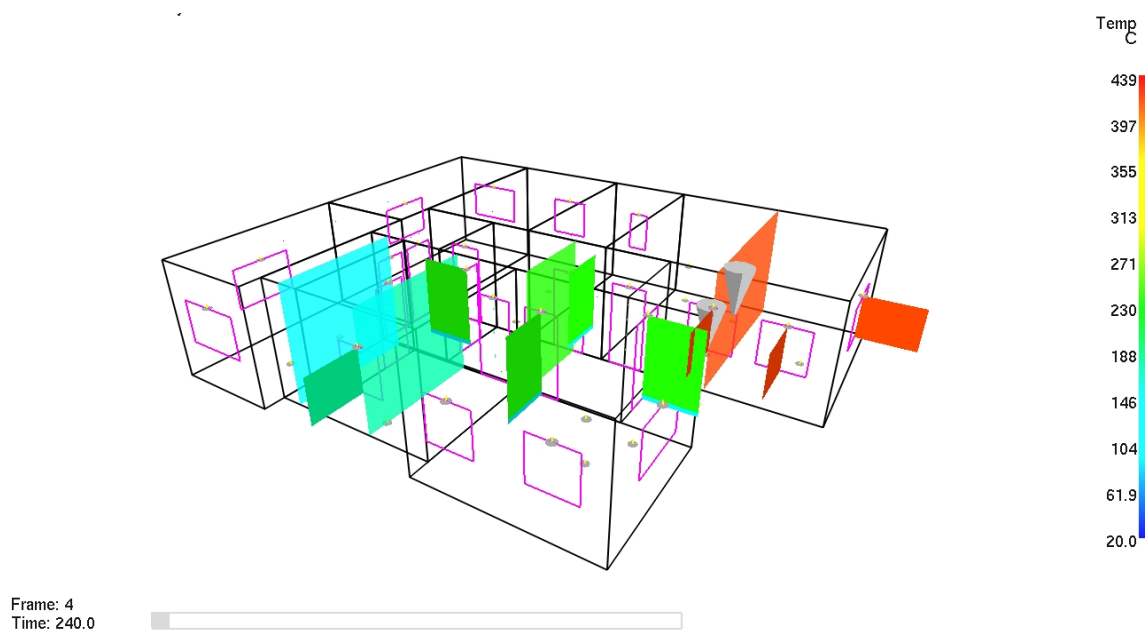


Figura 7.11 – Modelo de aberturas 4 – cálculo numérico.

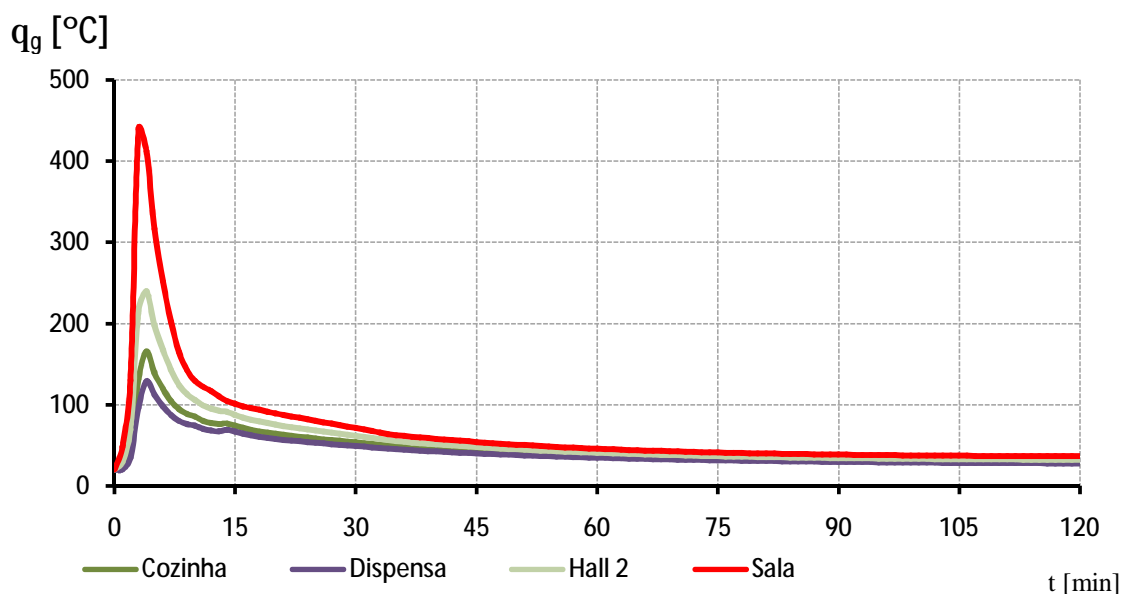


Gráfico 7.4 – Evolução da temperatura no modelo de aberturas 4.

Do gráfico 7.4 é possível concluir que a propagação do incêndio para os restantes compartimentos nesta situação de incêndio não é muito significativa. Este facto pode ter origem na carência de comburente nos compartimentos. Constata-se que nem toda a carga de incêndio do compartimento de eclosão chega a ser consumida, atingindo a temperatura de 439 °C, e que as temperaturas atingidas nos compartimentos adjacentes

como a cozinha (compartimento mais próximo com carga de incêndio mais elevada) não excedem o pico máximo de 166 °C.

7.3.5. Modelo de aberturas 5

Para o ensaio deste modelo, foi seguida a abordagem descrita na figura 7.12, admitindo-se que o incêndio eclode e permanece confinado na sala (compartimento 8), estando todos os envidraçados encerrados à exceção de um.

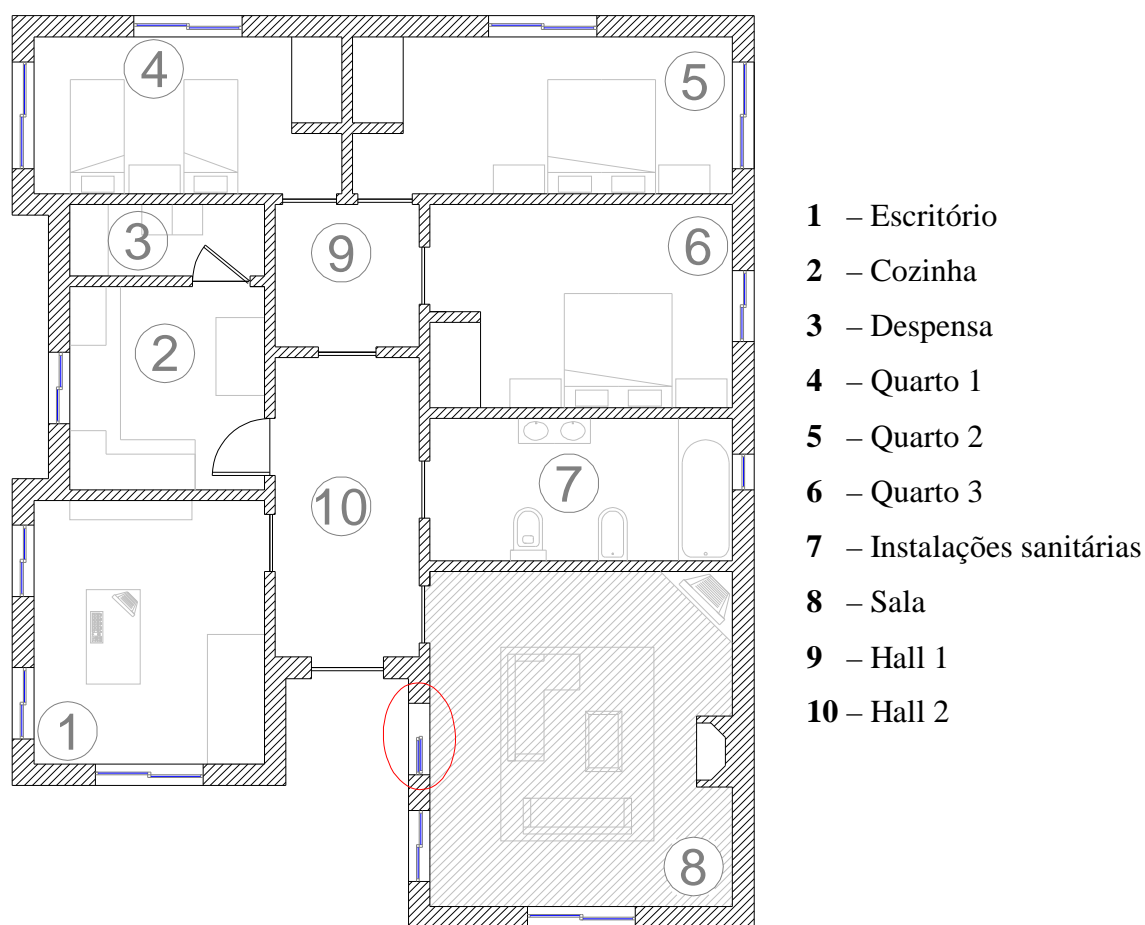


Figura 7.12 – Modelo de aberturas 5.

Este modelo em estudo segundo o método de cálculo do software utilizado, vai dar origem ao desenvolvimento de incêndio descrito na figura 7.13. Nela, pode-se ver o incêndio a decorrer na “sala”, com a sua eclosão numa cadeira e propagação para o mobiliário na sua proximidade.

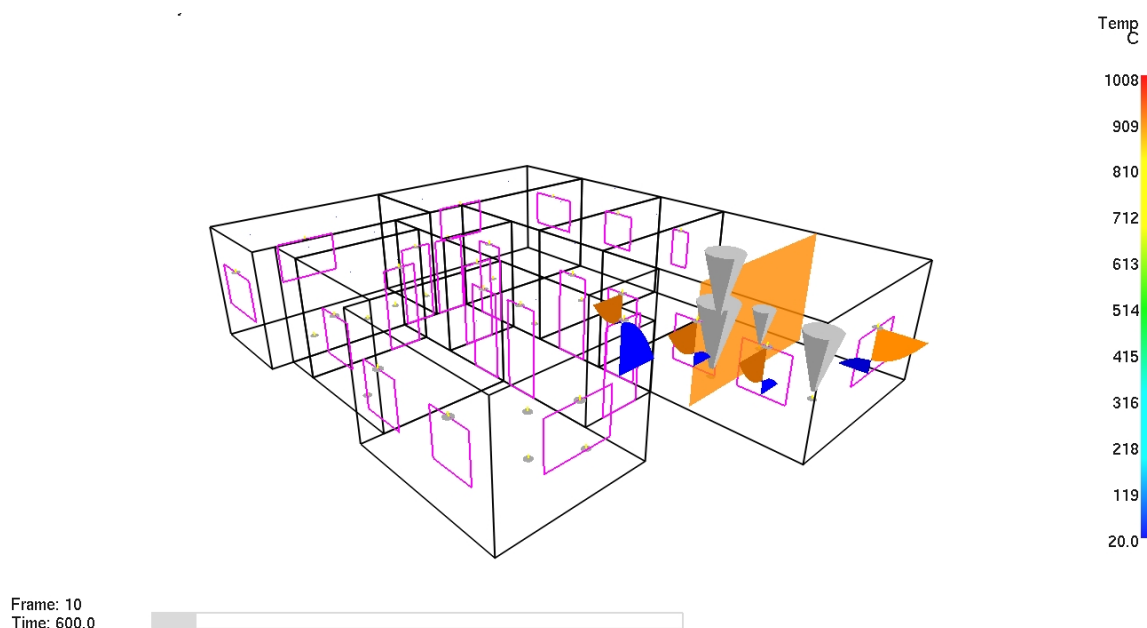


Figura 7.13 – Modelo de aberturas 5 – cálculo numérico.

Para melhor compreender o desenvolvimento deste foco de incêndio e a evolução da temperatura ao longo do tempo, o gráfico 7.5 descreve a evolução da temperatura da camada superior de gases quentes no compartimento de eclosão.

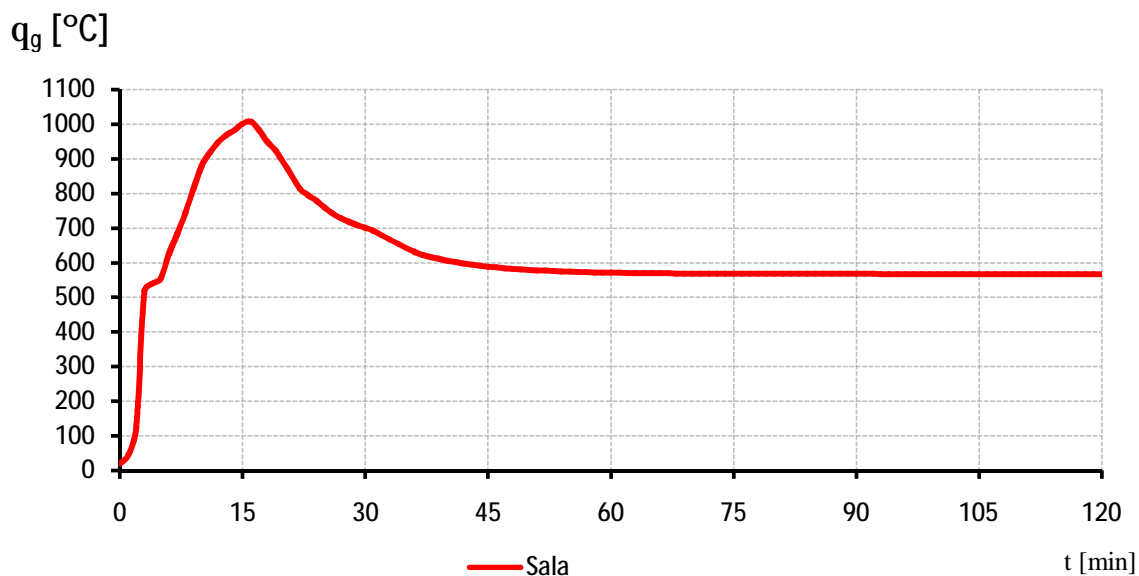


Gráfico 7.5 – Evolução da temperatura no modelo de aberturas 5.

No gráfico 7.5 é possível seguir a evolução da temperatura devido do incêndio, observando que é atingida a temperatura de 1080 °C.

7.3.6. Modelo de aberturas 6

Para o ensaio deste modelo, a abordagem foi semelhante ao anterior método, tal como descreve a figura 7.14. O incêndio eclode e encontra-se confinado na sala (compartimento 8), mas é feita a comparação da evolução da temperatura na sala com a variação da abertura dos envidraçados.

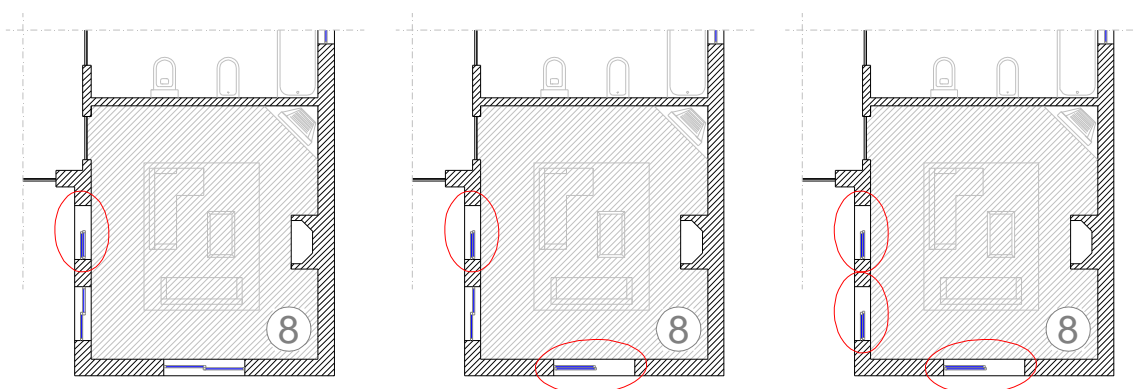


Figura 7.14 – Modelo de aberturas 6, com sequência de variação de aberturas.

Esta análise foi efectuada em modelos separados (segundo a sequência apresentada da esquerda para a direita na figura 7.14), diferenciados pelo número de aberturas. Uma vez que o modelo base é o mesmo, apenas diferindo na evolução da temperatura com o tempo, o desenvolvimento do incêndio no compartimento segundo o método de cálculo do software utilizado vai dar origem ao seguinte desenvolvimento de incêndio similar ao descrito na figura 7.13 para todos os casos.

Para melhor compreender o desenvolvimento deste foco de incêndio e a evolução da temperatura ao longo do tempo em função do número de aberturas, o gráfico 7.6 descreve a evolução da temperatura da camada superior de gases quentes no compartimento de eclosão.

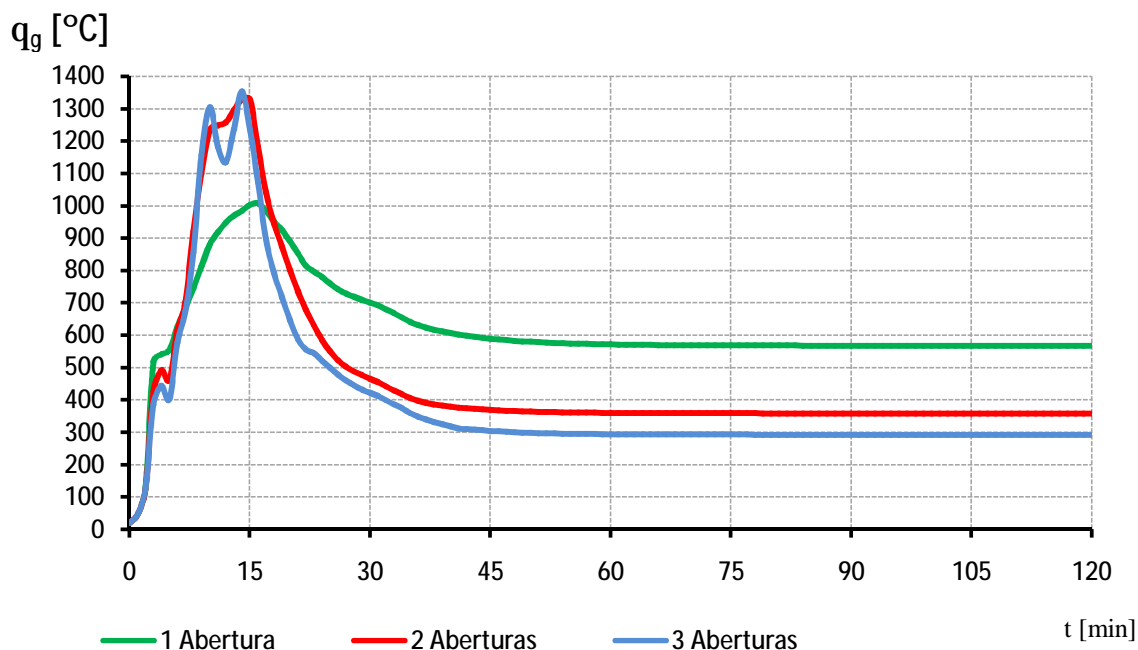


Gráfico 7.6 – Evolução da temperatura no modelo de aberturas 6.

Do gráfico 7.6 é possível compreender a importância da ventilação na propagação do incêndio. Assim, a situação em que o incêndio eclode com 3 aberturas atinge a temperatura de 1354 $^{\circ}\text{C}$ e apresenta uma taxa de arrefecimento mais rápido. A situação de eclosão com 2 aberturas atinge a temperatura de 1328 $^{\circ}\text{C}$ e com apenas uma abertura atinge-se 1008 $^{\circ}\text{C}$, como tinha sido verificado no modelo anterior.

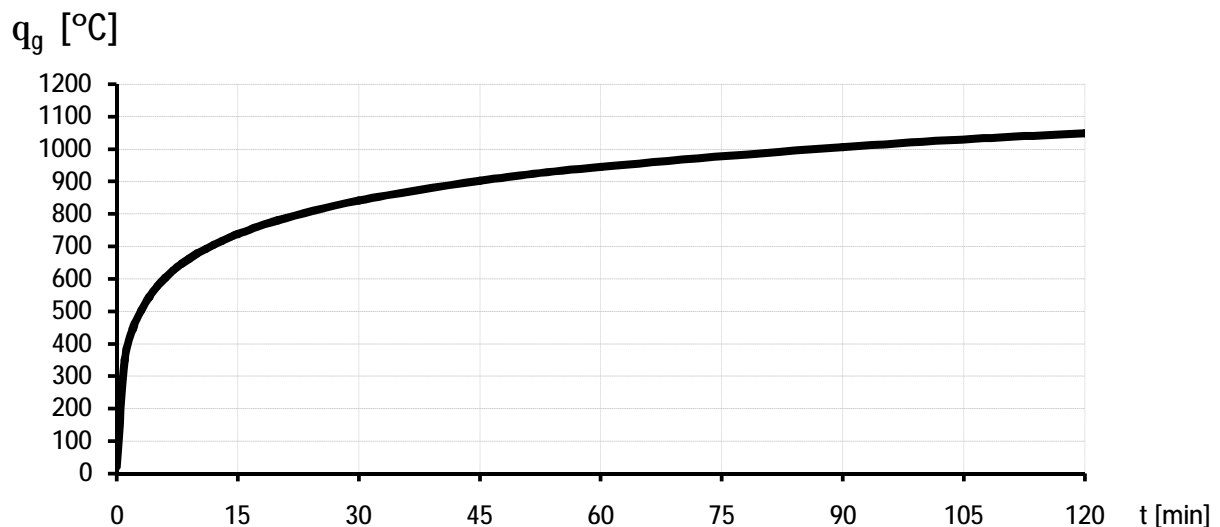
8. Comparação de curvas

Tal como foi abordado nos capítulos anteriores, o conhecimento que permite a previsão da evolução da temperatura no interior de um compartimento é um tema de extrema importância e existem diversos meios de prever essa evolução.

Foram até agora mencionados a análise do incêndio natural, inviável em muitos casos de análise devido aos meios que mobiliza, podendo contudo ser adaptada a uma simulação computacional como previsto no capítulo 7, e o recurso a curvas normalizadas nominais ou paramétricas, tal como previsto no capítulo 6.

Desta forma, será feita neste capítulo a comparação de todos os dados obtidos nos diversos modelos de simulação computacional com as respectivas curvas paramétricas e a curva de incêndio padrão (ISO 834), de acordo com a expressão 6.1 e o gráfico 6.2.

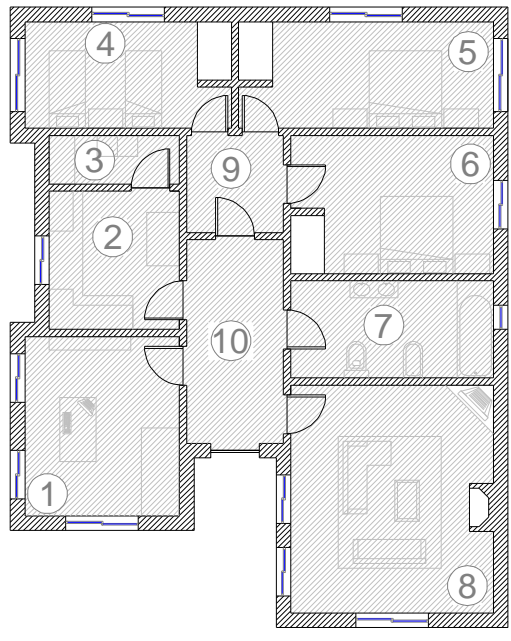
$$\theta_g = T_0 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1)$$



Para a construção da curva paramétrica, é de referir que a densidade de carga de incêndio utilizada na simulação computacional foi de 576,34 MJ/m². De acordo com a Parte 1-2 do Eurocódigo 1, a densidade de carga de incêndio para espaços ocupados como habitação apresenta valores médios de 780 MJ/m². Contudo a densidade de carga de incêndio a utilizar nas secções seguintes será a considerada na simulação computacional.

8.1. Modelo de aberturas 1

O modelo de aberturas 1, como foi anteriormente referido, apresenta as seguintes características em termos de áreas de pavimento e áreas de abertura, referidas na tabela 8.1.



	Divisão	Área de pavimento [m ²]	Área de aberturas exteriores [m ²]
1	Escritório	11.90	-
2	Cozinha	7.80	-
3	Despensa	2.76	-
4	Quarto 1	9.36	-
5	Quarto 2	11.56	-
6	Quarto 3	11.92	-
7	Instalações sanitárias	8.46	-
8	Sala	19.8	-
9	Hall 1	4.23	-
10	Hall 2	8.85	-
	Área	96,64	-

Tabela 8.1 – Áreas de pavimentos e de aberturas exteriores do modelo 1.

A correspondente curva paramétrica baseia-se nas características adoptadas para este modelo, assumindo toda a habitação como sendo um único compartimento.

8.1.1. Curva paramétrica

No capítulo 6 foi feita referência à expressão que permite construir a curva paramétrica que descreve a evolução da temperatura de um incêndio em função do tempo.

Desta forma, seguindo essa metodologia e fazendo uso das seguintes equações:

$$A_v = \sum A_i = 0 \text{ m}^2$$

$$h_{eq} = \sum A_i \cdot H_i / \sum A_i = 2 \text{ m}$$

$$A_t = 329,78 \text{ m}^2$$

$$A_f = 96,64 \text{ m}^2$$

$$0 = A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} / A_t = 0 \Rightarrow 0 = 0,02 \text{ m}^{1/2}$$

Para o cálculo do factor de inércia da envolvente (factor b), é utilizada a expressão 6.8:

$$b = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} \quad ; \quad 100 \leq b \leq 2200 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K};$$

Onde pelos dados da tabela 7.3,

Gesso cartonado	Tacos de madeira	Ladrilhos e azulejos
$\lambda = 0,16 \text{ W/m.K}$	$\lambda = 0,087 \text{ W/m.K}$	$\lambda = 0,18 \text{ W/m.K}$
$c = 900 \text{ J/kg.K}$	$c = 1560 \text{ J/kg.K}$	$c = 1293 \text{ J/kg.K}$
$\rho = 790 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 350 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 737 \text{ kg/m}^3$
$b = 337,28 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}$	$b = 217,95 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}$	$b = 414,16 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}$

Tabela 8.2 – Tabela de materiais no compartimento.

O factor de inércia referente aos tacos de madeira foi desprezado pelo facto do aumento de temperatura numa situação de incêndio solicitar principalmente o tecto e as paredes.

Como tal, sendo $b_{\text{gesso cartonado}} < b_{\text{ladrilhos e azulejos}} \Rightarrow b = 337,28 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}..$

$$\Gamma = \left[\frac{0,04}{b/1160} \right]^2 = 2,957;$$

O cálculo da densidade de carga de incêndio é obtido de acordo com a seguinte expressão,

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n$$

Como se determinou anteriormente, o valor médio da densidade de carga de incêndio é de 576,34 MJ/m², sendo o seu quantilho 80% (O quantilho 80% é um dado estatístico experimental para o valor de referencia de densidade de carga de incêndio, e como tal, para a densidade de carga de incêndio utilizada foi considerado o quantilho de 80% como sendo uma proporção com o valor de referencia) igual a $q_{f,k} = 700,84$ MJ/m². Para o cálculo dos restantes factores da expressão 6.34, considerou-se uma habitação repleta de materiais combustíveis celulósicos e como tal adoptou-se o factor de combustível (m) igual a 0,8.

O factor parcial que tem em conta o risco de activação do incêndio em função das dimensões do compartimento (δ_{q1}), obtém-se por interpolação da tabela 6.3 e assume o valor de **1,23**.

O factor parcial que tem em conta o risco de activação do incêndio em função do tipo de ocupação do compartimento (δ_{q2}) é obtido de acordo com a tabela 6.4 e sendo uma habitação assume o valor de 1,00.

O factor parcial que quantifica a influência das medidas activas de segurança contra incêndio (δ_n) é obtido de acordo com a tabela 6.5 e assume o valor de 1,053. Este valor é devido ao facto de, tratando-se de uma habitação privada que não apresenta extinção automática nem detecção automática contra incêndio, a mesma não se compadece com a permanência de bombeiros privados. Como tal os factores δ_{n1} a δ_{n6} assumem o valor de 1,00. Estão previstas vias de acesso seguras e desimpedidas a meios de primeira intervenção e bombeiros sapadores em caso de incêndio. Como tal, δ_{n7} assume o valor de 0,78 para vias de acesso seguras, δ_{n8} assume o valor de 0,9 e δ_{n9} assume o valor de 1,0. Pelo facto de não existirem sistemas de evacuação de fumos, δ_{n10} toma o valor de 1,5.

Nestas condições, obtém-se uma densidade de carga de incêndio de cálculo igual a $q_{f,d} = 726,16$ MJ/m².

Desta forma, pela equação 6.20, a densidade de carga de incêndio na área da envolvente é de $q_{t,d} = 726,16 \cdot 96,64/329,78 = 212,80$ MJ/m².

Recorrendo à tabela 6.2 para avaliar a velocidade média de propagação na habitação, obtém-se t_{lim} de 20 minutos (0,33 horas).

Assim, o tempo máximo de aquecimento expresso pela expressão 6.19, apresenta um valor de t_{max} de 2,128 horas (≈ 127 minutos). Como este valor é diferente de t_{lim} , então o incêndio diz-se controlado pela ventilação.

Desta forma o tempo fictício máximo (t_{max}^*), obtido segundo a expressão 6.18, assume o valor de 6,293. Assim, a expressão 6.5 descreve a evolução da temperatura durante a fase de aquecimento segundo a expressão de tempo fictício até se atingir t_{max}^* , iniciando-se subsequentemente a fase de arrefecimento.

A fase de arrefecimento é caracterizada por uma função linear, com um declive descrito pela expressão 6.30. Como $t_{max}^* = 6,293$, então $\frac{d\theta_g}{dt^*} = -250$.

O tempo de arrefecimento é obtido segundo a expressão 6.32,

$$t_{arref} = \frac{20 - \theta_{max}}{\dot{\theta}_g} = \frac{20 - 1223,2}{-739,3} = 1,626 \text{ horas}$$

Deste modo, utilizando a expressão 6.33, é possível prever a duração total do incêndio.

$$t_{TOTAL} = t_{max} + t_{arref} = 2,128 + 1,626 = 3,754 \text{ horas } (\approx 225 \text{ minutos})$$

O gráfico 8.1 representa a evolução da temperatura em função do tempo, embora não abranja 225 minutos pois encontra-se limitado a 120 minutos.

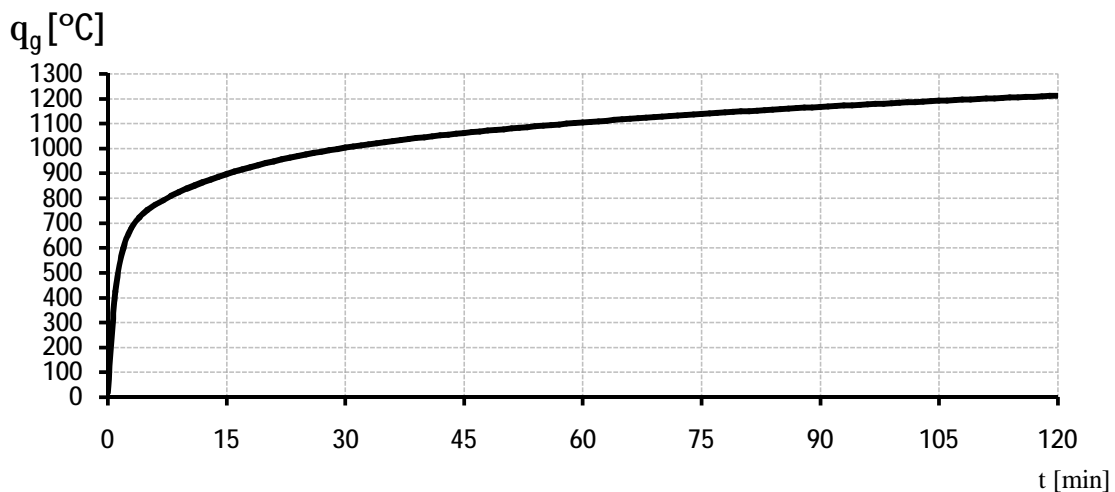


Gráfico 8.1 – Curva paramétrica para o modelo 1.

8.1.2. Comparação de curvas

A simulação computacional do modelo de aberturas 1 realizada no capítulo anterior, quando comparada com a curva de incêndio padrão (ISO 834) representada no gráfico 6.2 e com a curva paramétrica representativa deste modelo, dá origem ao gráfico 8.2.

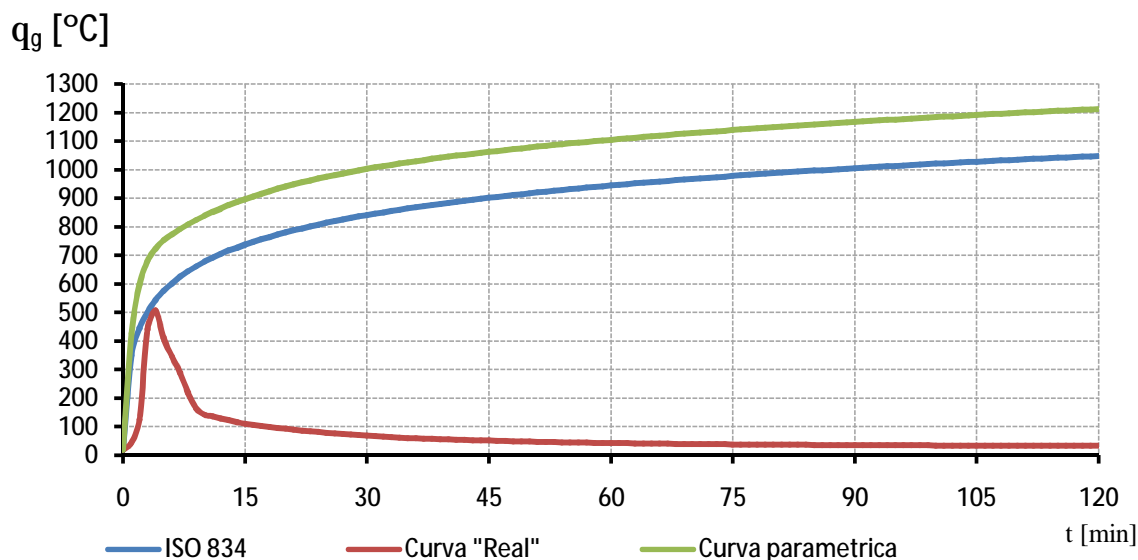
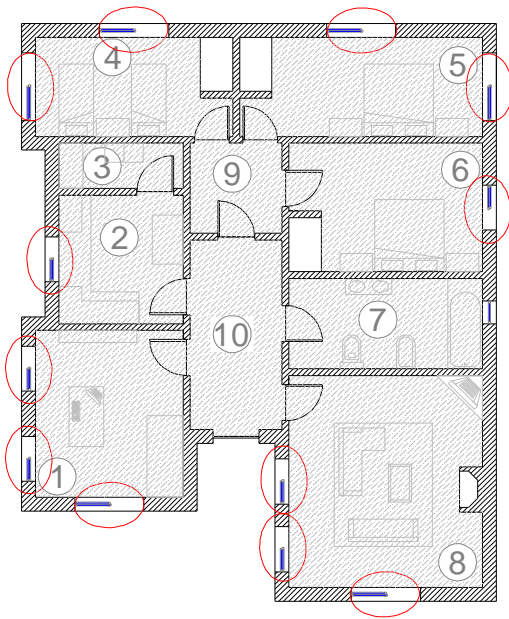


Gráfico 8.2 – Comparação das curvas ISO 834, paramétrica e real segundo o modelo 1.

Neste gráfico é possível verificar que a curva paramétrica que descreve as condições do modelo de aberturas 1 atinge temperaturas mais severas do que a curva de incêndio padrão. Para as mesmas condições impostas ao modelo de simulação computacional, é notória que a curva correspondente é muito menos severa que as restantes curvas. Tal pode ser devido ao facto de nesta simulação computacional não se considerarem aberturas, podendo pois o incêndio extinguir-se prematuramente por carência de comburente, o que pode explicar as reduzidas temperaturas atingidas.

8.2. Modelo de aberturas 2

O modelo de aberturas 2, como foi anteriormente referido, apresenta as características em termos de áreas de pavimento e áreas de abertura referidas na tabela 8.3.



	Divisão	Área de pavimento [m ²]	Área de aberturas exteriores [m ²]
1	Escritório	11.90	3.50
2	Cozinha	7.80	1.00
3	Despensa	2.76	-
4	Quarto 1	9.36	2.50
5	Quarto 2	11.56	2.50
6	Quarto 3	11.92	1.00
7	Instalações sanitárias	8.46	-
8	Sala	19.8	3.50
9	Hall 1	4.23	-
10	Hall 2	8.85	2.00
	Área	96,64	16.00

Tabela 8.3 – Áreas de pavimentos e de aberturas exteriores do modelo 2.

Os dados acima servem de base para o cálculo da curva paramétrica para este modelo, assumindo toda a habitação como um único compartimento.

8.2.1. Curva paramétrica

A curva paramétrica que descreve a evolução da temperatura de um incêndio em função do tempo para o modelo em estudo foi efectuada seguindo a metodologia no capítulo 6, de acordo com seguintes expressões:

$$A_v = \sum A_i = 16 \text{ m}^2$$

$$h_{eq} = \sum A_i \cdot H_i / \sum A_i = 2 \text{ m}$$

$$A_t = 329,78 \text{ m}^2$$

$$A_f = 96,64 \text{ m}^2$$

$$O = A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} / A_t = 0,07 \text{ m}^{1/2}$$

Para o cálculo do factor de inércia da envolvente (factor b), como se trata do mesmo compartimento as características de inércia mantêm-se idênticas às do modelo anterior.

$$b_{\text{gesso cartonado}} < b_{\text{ladrilhos e azulejos}} \Rightarrow b = 337,28 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}$$

$$\Gamma = \left[\frac{0/0,04}{b/1160} \right]^2 = 35,20;$$

Para o cálculo da densidade de carga de incêndio, tendo em conta que relativamente ao modelo de estudo anterior apenas se variou a ventilação, mantendo as mesmas medidas activas de protecção contra incêndio, a densidade de carga de incêndio e a área de pavimento mantêm-se, com o correspondente valor de cálculo $q_{f,d} = 726,16 \text{ MJ/m}^2$.

Desta forma pela equação 6.20, a densidade de carga de incêndio na área da envolvente é de $q_{t,d} = 726,16 \cdot 96,64/329,78 = 212,80 \text{ MJ/m}^2$.

Recorrendo à tabela 6.2 para avaliar a velocidade média de propagação na habitação, obtém-se t_{lim} de 20 minutos (0,33 horas).

Assim, o tempo máximo de aquecimento expresso pela expressão 6.19 apresenta um valor de t_{max} de 0,617 horas (≈ 37 minutos). Como este valor é diferente de t_{lim} , então o incêndio diz-se controlado pela ventilação.

Desta forma, o tempo fictício máximo (t_{max}^*), obtido segundo a expressão 6.18, assume o valor de 21,71. Assim, a expressão 6.5 descreve a evolução da temperatura durante a fase de aquecimento segundo a expressão de tempo fictício até se atingir t_{max}^* , iniciando subsequentemente a fase de arrefecimento.

A fase de arrefecimento é caracterizada por uma função linear, com um declive descrito pela expressão 6.30. Como $t_{max}^* = 21,71$, então $\frac{d\theta_g}{dt^*} = -250$.

O tempo de arrefecimento, este é obtido segundo a expressão 6.32,

$$t_{arref} = \frac{20 - \theta_{max}}{\dot{\theta}_g} = \frac{20 - 1339,41}{-8799} = 0,15 \text{ horas}$$

Deste modo, através da expressão 6.33, é possível de prever a duração total do incêndio.

$$t_{TOTAL} = t_{max} + t_{arref} = 0,62 + 0,15 = 0,77 \text{ horas } (\approx 46 \text{ minutos})$$

Desta forma, o gráfico 8.3 representa a evolução da temperatura em função do tempo.

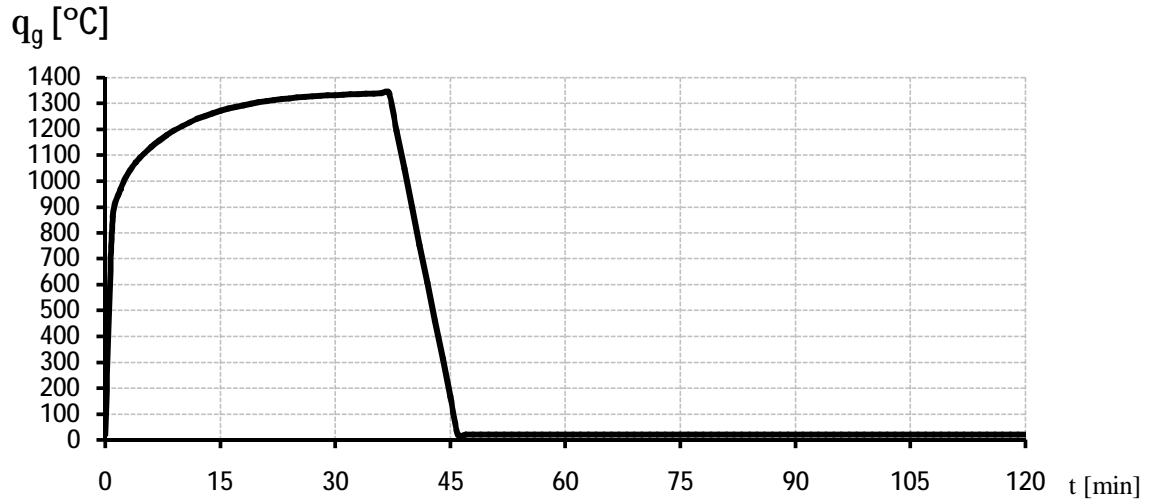


Gráfico 8.3 – Curva paramétrica para o modelo 2.

8.2.2. Comparação de curvas

A análise da simulação computacional do modelo de aberturas 2 realizada na secção anterior, quando comparada com a curva de incêndio padrão (ISO 834) representada no gráfico 6.2, e com a curva paramétrica representativa desse modelo, dá origem ao gráfico 8.4.

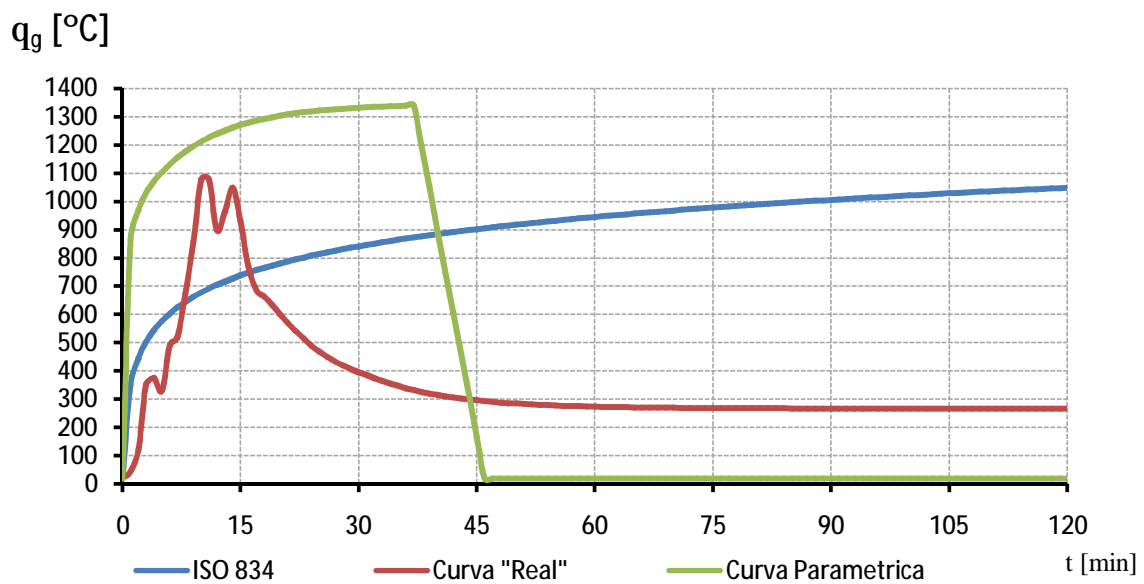


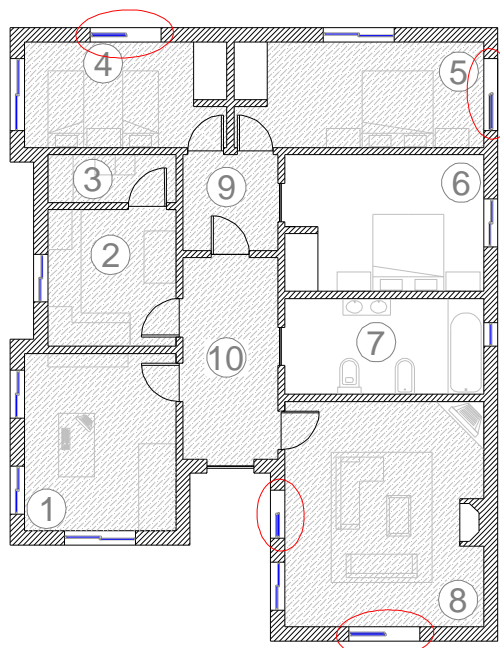
Gráfico 8.4 – Comparação das curvas ISO 834, paramétrica e real segundo o modelo 2.

Neste gráfico é possível verificar que a curva paramétrica que descreve as condições do modelo de aberturas 2 atinge temperaturas muito mais severas do que a curva de incêndio padrão. Para as mesmas condições impostas ao modelo de simulação computacional, a curva real apresenta uma notória diferença do modelo anterior, pois agora o compartimento foi simulado com aberturas que permitem uma quantidade considerável de ventilação, sendo o incêndio nos primeiros instantes mais severo e atingindo temperaturas mais elevadas que as previstas pela curva de incêndio padrão.

Contudo apesar da rápida evolução da temperatura no interior do compartimento provocada pela situação de incêndio real que foi simulada, esta nos primeiros instantes do incêndio atingiu temperaturas elevadas na ordem dos 1080 °C, mas ainda assim inferiores à temperatura prevista pela curva paramétrica para as mesmas condições. Observa-se ainda que o declínio da temperatura que descreve o arrefecimento da curva paramétrica é muito mais acentuado do que a curva de incêndio real.

8.3. Modelo de aberturas 3

O modelo de aberturas 3, como foi anteriormente referido, apresenta as características em termos de áreas de pavimento e áreas de abertura, referidos na tabela 8.4.



	Divisão	Área de pavimento [m ²]	Área de aberturas exteriores [m ²]
1	Escritório	11.90	-
2	Cozinha	7.80	-
3	Despensa	2.76	-
4	Quarto 1	9.36	1.50
5	Quarto 2	11.56	1.00
6	Quarto 3	-	-
7	Instalações sanitárias	-	-
8	Sala	19.8	2.50
9	Hall 1	4.23	-
10	Hall 2	8.85	-
	Área	76.26	5.00

Tabela 8.4 – Tabela de área de pavimento e aberturas exteriores do modelo 3.

A correspondente curva paramétrica baseia-se nas características adoptadas para este modelo, assumindo toda a habitação como sendo um único compartimento.

8.3.1. Curva paramétrica

A curva paramétrica que descreve a evolução da temperatura de um incêndio em função do tempo para este modelo foi realizada seguindo a metodologia do capítulo 6, de acordo com as seguintes expressões:

$$\begin{aligned}A_v &= \sum A_i = 5 \text{ m}^2 \\h_{eq} &= \sum A_i \cdot H_i / \sum A_i = 2 \text{ m} \\A_t &= 319,02 \text{ m}^2 \\A_f &= 76,26 \text{ m}^2 \\0 &= A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} / A_t = 0,022 \text{ m}^{1/2}\end{aligned}$$

O factor de inércia referente aos tacos de madeira foi desprezado pelo facto do aumento de temperatura numa situação de incêndio solicitar principalmente o tecto e as paredes.

Como tal, sendo $b_{\text{gesso cartonado}} < b_{\text{ladrilhos e azulejos}} \Rightarrow b = 337,28 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}$.

$$\Gamma = \left[\frac{0/0,04}{b/1160} \right]^2 = 3,578;$$

A densidade de carga de incêndio é obtida de acordo com a seguinte expressão,

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n$$

O valor médio da densidade de carga de incêndio referido anteriormente e não sofrendo alterações é de $q_{f,k} = 700,84 \text{ MJ/m}^2$. Todos os factores que intervêm na expressão 6.34 referentes a medidas de protecção activa mantêm-se inalteráveis (δ_n) com o valor de

1,053, assim como o risco de activação do incêndio em função do tipo de ocupação do compartimento (δ_{q2}) que mantém o valor de 1,00.

Quanto ao factor parcial que tem em conta o risco de activação do incêndio em função das dimensões do compartimento (δ_{q1}), atendendo a que a área do compartimento diminuiu, segundo uma interpolação da tabela 6.3, passa a tomar o valor de **1,19**.

Obtém-se assim origem a uma densidade de carga de incêndio de cálculo igual a $q_{f,d} = 702,55 \text{ MJ/m}^2$.

Desta forma, pela equação 6.20, a densidade de carga de incêndio pela área da envolvente é de $q_{t,d} = 726,16 \cdot 76,26/319,02 = 167,94 \text{ MJ/m}^2$.

Recorrendo à tabela 6.2 para avaliar a velocidade média de propagação na habitação, obtém-se t_{lim} de 20 minutos (0,33 horas).

Assim, o tempo máximo de aquecimento expresso pela expressão 6.19, apresenta um valor de t_{max} de 1,526 horas (≈ 92 minutos). Como este valor é diferente de t_{lim} , então o incêndio diz-se controlado pela ventilação.

Desta forma o tempo fictício máximo (t_{max}^*), obtido segundo a expressão 6.18, assume o valor de 5,459. Assim a expressão 6.5 descreve a evolução da temperatura durante a fase de aquecimento segundo a expressão de tempo fictício 6.6 até se atingir t_{max}^* , iniciando-se subsequentemente a fase de arrefecimento.

A fase de arrefecimento é caracterizada por uma função linear, com um declive descrito pela expressão 6.30. Como $t_{max}^* = 5,459$, então $\frac{d\theta_g}{dt^*} = -250$.

O tempo de arrefecimento, este é obtido segundo a expressão 6.32,

$$t_{arref} = \frac{20 - \theta_{max}}{\dot{\theta}_g} = \frac{20 - 1199,97}{-894,5} = 1,319 \text{ horas}$$

Deste modo, utilizando a expressão 6.33, é possível prever a duração total do incêndio.

$$t_{TOTAL} = t_{max} + t_{arref} = 1,526 + 1,319 = 2,845 \text{ horas } (\approx 171 \text{ minutos})$$

O gráfico 8.5 representa a evolução da temperatura em função do tempo, embora não abranja 171 minutos pois encontra-se limitado a 120 minutos.

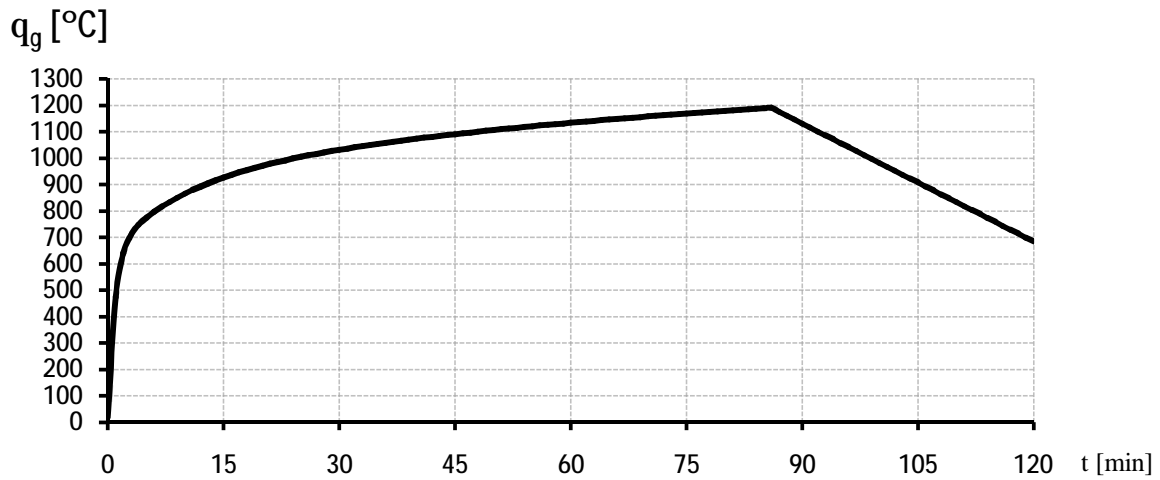


Gráfico 8.5 – Curva paramétrica para o modelo 3.

8.3.2. Comparação de curvas

A simulação computacional do modelo de aberturas 3, realizada no capítulo anterior, quando comparada com a curva de incêndio padrão (ISO 834) representada no gráfico 6.2 e com a curva paramétrica representativa desse modelo, dá origem ao gráfico 8.6.

Neste gráfico é possível verificar que a curva paramétrica que descreve as condições do modelo de aberturas 3 atinge temperaturas mais severas do que a curva de incêndio padrão. Para as mesmas condições impostas ao modelo de simulação computacional, é notória a sua diferença nos primeiros instantes, sendo esta curva muito mais severa que as restantes curvas.

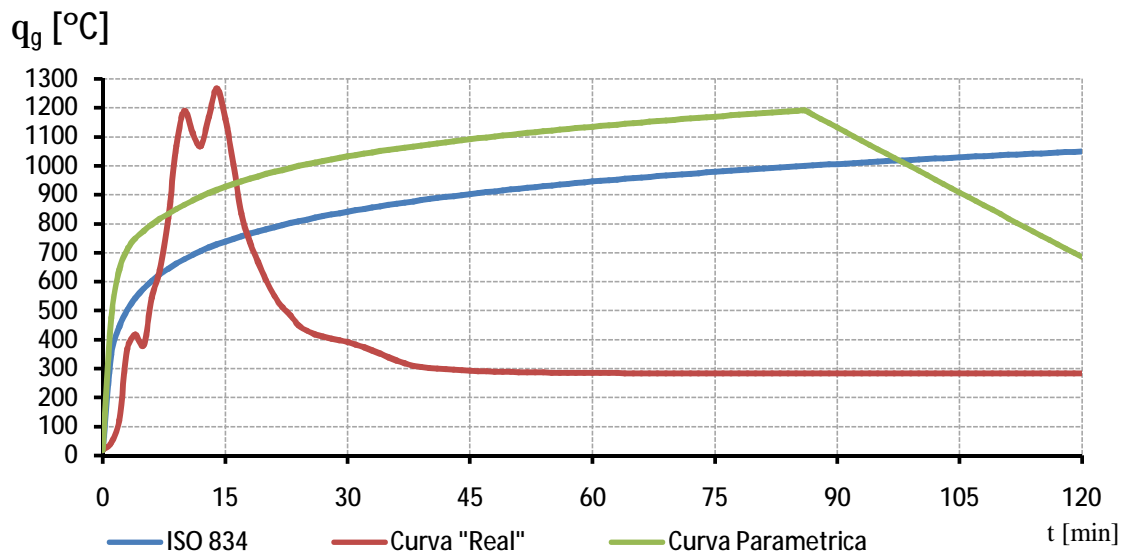
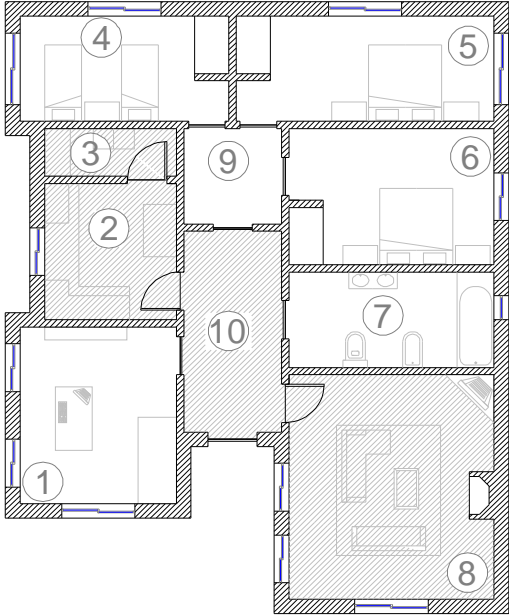


Gráfico 8.6 – Comparação das curvas ISO 834, paramétrica e real segundo o modelo 3.

8.4. Modelo de aberturas 4

O modelo de aberturas 4, como foi anteriormente referido apresenta as seguintes características em termos de áreas de pavimento e áreas de abertura, referidos na tabela 8.4.



	Divisão	Área de pavimento [m ²]	Área de aberturas exteriores [m ²]
1	Escritório	-	-
2	Cozinha	7.80	-
3	Despensa	2.76	-
4	Quarto 1	-	-
5	Quarto 2	-	-
6	Quarto 3	-	-
7	Instalações sanitárias	-	-
8	Sala	19.8	-
9	Hall 1	-	-
10	Hall 2	8.85	-
	Área	39.21	-

Tabela 8.5 – Área de pavimentos e de aberturas exteriores do modelo 4.

Os dados acima servem de base para o cálculo da curva paramétrica para este modelo, assumindo toda a habitação como um único compartimento.

8.4.1. Curva paramétrica

A curva paramétrica que descreve a evolução da temperatura de um incêndio em função do tempo para o modelo em estudo foi realizada seguindo a metodologia do capítulo 6, de acordo com as seguintes expressões,

$$A_v = \sum A_i = 0 \text{ m}^2$$

$$h_{eq} = \sum A_i \cdot H_i / \sum A_i = 2 \text{ m}$$

$$A_t = 195,42 \text{ m}^2$$

$$A_f = 39,21 \text{ m}^2$$

$$0 = A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} / A_t = 0 \Rightarrow 0 = 0,02 \text{ m}^{1/2}$$

O factor de inércia referente aos tacos de madeira foi desprezado pelo facto do aumento de temperatura numa situação de incêndio solicitar principalmente o tecto e as paredes.

Como tal, sendo $b_{\text{gesso cartonado}} < b_{\text{ladrilhos e azulejos}} \Rightarrow b = 337,28 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}$.

$$\Gamma = \left[\frac{0/0,04}{b/1160} \right]^2 = 2,957;$$

A densidade de carga de incêndio é obtido de acordo com a seguinte expressão,

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n$$

O valor médio da densidade de carga de incêndio referido anteriormente e não sofrendo alterações é de $q_{f,k} = 700,84 \text{ MJ/m}^2$. Todos os factores que intervêm da expressão 6.34 referente a medidas de protecção activa mantêm-se inalteráveis (δ_n) com o valor de 1,053, assim como o risco de activação do incêndio em função do tipo de ocupação do compartimento (δ_{q2}) que mantém o valor de 1,00.

Quanto ao factor parcial que tem em conta o risco de activação do incêndio em função das dimensões do compartimento (δ_{q1}), atendendo a que a área do compartimento diminuiu, segundo uma interpolação da tabela 6.3, passa a tomar o valor de **1,13**.

Obtém-se assim uma densidade de carga de incêndio de cálculo de $q_{f,d} = 667,13 \text{ MJ/m}^2$.

Desta forma, pela equação 6.20, a densidade de carga de incêndio pela área da envolvente é de $q_{t,d} = 667,13 \cdot 39,21/195,42 = 133,86 \text{ MJ/m}^2$.

Recorrendo à tabela 6.2 para avaliar a velocidade média de propagação na habitação, obtém-se t_{lim} de 20 minutos (0,33 horas).

Assim, o tempo máximo de aquecimento expresso pela expressão 6.19 apresenta um valor de t_{max} de 1,339 horas (≈ 80 minutos). Como este valor é diferente de t_{lim} , então o incêndio diz-se controlado pela ventilação.

Desta forma o tempo fictício máximo (t_{max}^*), obtido segundo a expressão 6.18, assume o valor de 3,958. Assim a expressão 6.5 descreve a evolução da temperatura durante a fase de aquecimento segundo a expressão de tempo fictício 6.6 até se atingir t_{max}^* , iniciando-se subsequentemente a fase de arrefecimento.

A fase de arrefecimento é caracterizada por uma função linear, com um declive descrito pela expressão 6.30. Como $t_{max}^* = 3,958$, então $\frac{d\theta_g}{dt^*} = -250$.

De forma a encontrar o tempo de arrefecimento, este é obtido segundo a expressão 6.32,

$$t_{arref} = \frac{20 - \theta_{max}}{\dot{\theta}_g} = \frac{20 - 1149,56}{-739,3} = 1,528 \text{ horas}$$

Deste modo, através da expressão 6.33, é possível prever a duração total do incêndio.

$$t_{TOTAL} = t_{max} + t_{arref} = 1,339 + 1,528 = 2,867 \text{ horas } (\approx 172 \text{ minutos})$$

O gráfico 8.7 representa a evolução da temperatura em função do tempo, embora não abranja 172 minutos pois encontra-se limitado a 120 minutos.

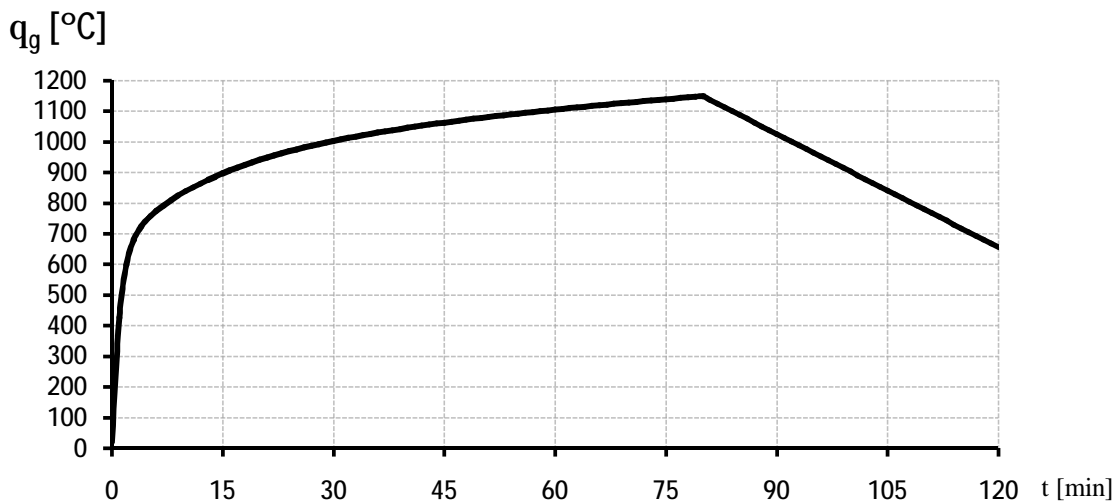


Gráfico 8.7 – Curva paramétrica para o modelo 4.

8.4.2. Comparação de curvas

A simulação computacional do modelo de aberturas 4, realizada no capítulo anterior, quando comparada com a curva de incêndio padrão (ISO 834) representada no gráfico 6.2 e com a curva paramétrica representativa desse modelo, dá origem ao gráfico 8.8.

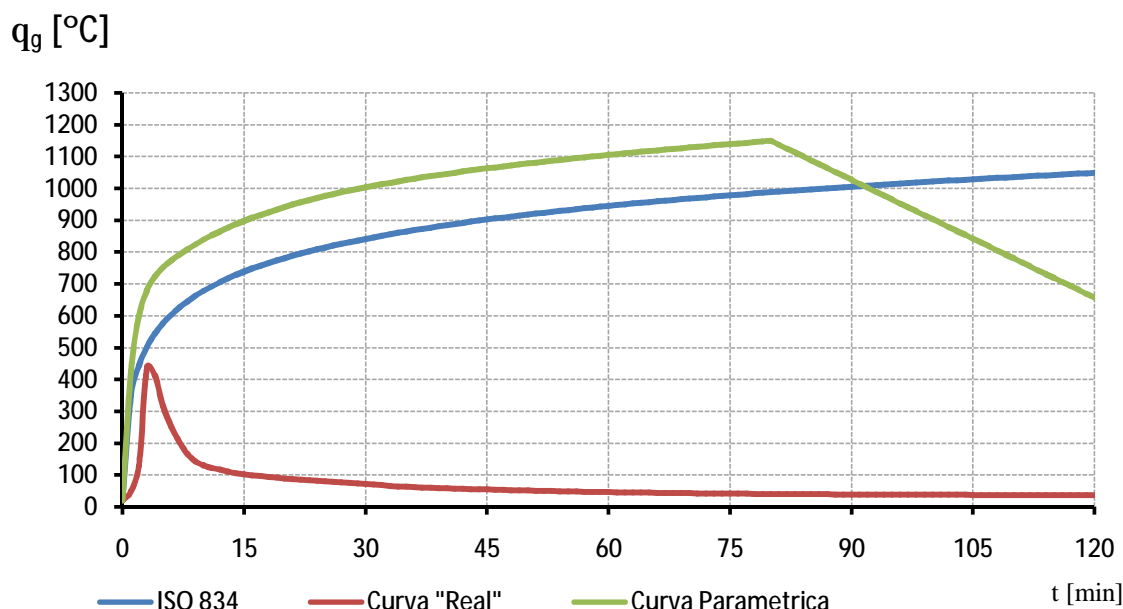
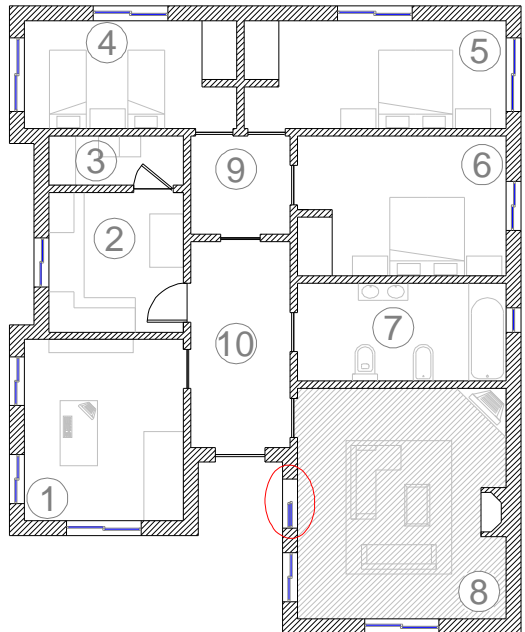


Gráfico 8.8 – Comparação das curvas ISO 834, paramétrica e real segundo o modelo 4.

Neste gráfico é possível verificar que a curva paramétrica que descreve as condições do modelo de aberturas 4 atinge temperaturas mais severas do que a curva de incêndio padrão. Para as mesmas condições impostas ao modelo de simulação computacional, é notória a diferença, sendo a curva “real” menos severa que as restantes curvas. Tal pode ser devido ao facto de nesta simulação computacional não se considerarem aberturas, o que pode conduzir o incêndio à sua extinção por carência de comburente e explicar os reduzidos valores de temperaturas atingidos.

8.5. Modelo de aberturas 5

O modelo de aberturas 5, como foi anteriormente referido, apresenta as características em termos de áreas de pavimento e áreas de abertura referidas na tabela 8.5.



	Divisão	Área de pavimento [m²]	Área de aberturas exteriores [m²]
1	Escritório	-	-
2	Cozinha	-	-
3	Despensa	-	-
4	Quarto 1	-	-
5	Quarto 2	-	-
6	Quarto 3	-	-
7	Instalações sanitárias	-	-
8	Sala	19.80	1.00
9	Hall 1	-	-
10	Hall 2	-	-
	Área	19.80	1.00

Tabela 8.6 – Área de pavimentos e de aberturas exteriores do modelo 5.

Os dados acima servem de base para o cálculo da curva paramétrica para este modelo, assumindo toda a sala como um único compartimento.

8.5.1. Curva paramétrica

A curva paramétrica que descreve a evolução da temperatura de um incêndio em função do tempo para o modelo em estudo foi realizada seguindo a metodologia do capítulo 6, de acordo com as seguintes expressões,

$$A_v = \sum A_i = 1 \text{ m}^2$$

$$h_{eq} = \sum A_i \cdot H_i / \sum A_i = 2 \text{ m}$$

$$A_t = 96,6 \text{ m}^2$$

$$A_f = 19,80 \text{ m}^2$$

$$0 = A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} / A_t = 0 \Rightarrow 0 = 0,02 \text{ m}^{1/2}$$

O factor de inércia referente aos tacos de madeira foi desprezado pelo facto do aumento de temperatura numa situação de incêndio solicitar principalmente o tecto e as paredes.

Como tal, sendo $b_{\text{gesso cartonado}} < b_{\text{ladrilhos e azulejos}} \Rightarrow b = 337,28 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}$.

$$\Gamma = \left[\frac{0/0,04}{b/1160} \right]^2 = 2,957;$$

A densidade de carga de incêndio é obtida de acordo com a seguinte expressão,

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n$$

O valor médio da densidade de carga de incêndio referido anteriormente e não sofrendo alterações é de $q_{f,k} = 700,84 \text{ MJ/m}^2$. Todos os factores que intervêm da expressão 6.34 referentes a medidas de protecção activa mantêm-se inalteráveis (δ_n) com o valor de 1,053, assim como o risco de activação do incêndio em função do tipo de ocupação do compartimento (δ_{q2}) que mantêm o valor de 1,00.

Quanto ao factor parcial que tem em conta o risco de activação do incêndio em função das dimensões do compartimento (δ_{q1}), atendendo a que a área do compartimento diminuiu, segundo uma interpolação da tabela 6.3, passa a tomar o valor de **1,09**.

Obtém-se assim uma densidade de carga de incêndio de cálculo de $q_{f,d} = 643,51 \text{ MJ/m}^2$.

Desta forma pela equação 6.20, a densidade de carga de incêndio pela área da envolvente é de $q_{t,d} = 643,51 \cdot 19,80/96,60 = 131,90 \text{ MJ/m}^2$.

Recorrendo à tabela 6.2 para avaliar a velocidade média de propagação na habitação, obtém-se t_{lim} de 20 minutos (0,33 horas).

Assim, o tempo máximo de aquecimento expresso pela expressão 6.19 apresenta um valor de t_{max} de 1,319 horas (≈ 79 minutos). Como este valor é diferente de t_{lim} , então o incêndio diz-se controlado pela ventilação.

Desta forma o tempo fictício máximo (t_{max}^*), obtido segundo a expressão 6.18, assume o valor de 3,900. Assim a expressão 6.5 descreve a evolução da temperatura durante a fase de aquecimento segundo a expressão de tempo fictício 6.6 até se atingir t_{max}^* , iniciando-se assim subsequentemente a fase de arrefecimento.

A fase de arrefecimento é caracterizada por uma função linear, com um declive descrito pela expressão 6.30. Como $t_{max}^* = 3,900$, então $\frac{d\theta_g}{dt^*} = -250$.

De forma a encontrar o tempo de arrefecimento, este é obtido segundo a expressão 6.32,

$$t_{arref} = \frac{20 - \theta_{max}}{\dot{\theta}_g} = \frac{20 - 1147,59}{-739,3} = 1,525 \text{ horas}$$

Deste modo, através da expressão 6.33, é possível prever a duração total do incêndio.

$$t_{TOTAL} = t_{max} + t_{arref} = 1,319 + 1,525 = 2,844 \text{ horas } (\approx 171 \text{ minutos})$$

O gráfico 8.9 representa a evolução da temperatura em função do tempo, embora não abranja 171 minutos pois encontra-se limitado a 120 minutos.

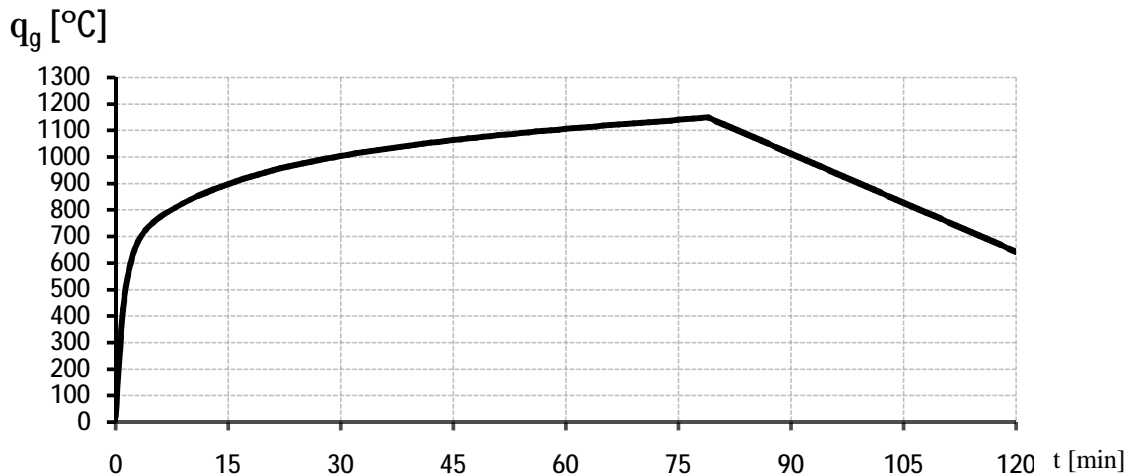


Gráfico 8.9 – Curva paramétrica para o modelo 5.

8.5.2. Comparação de curvas

A simulação computacional do modelo de aberturas 5, realizada no capítulo anterior, quando comparada com a curva de incêndio padrão (ISO 834) representada no gráfico 6.2 e com a curva paramétrica representante desse modelo, dá origem ao gráfico 8.10.

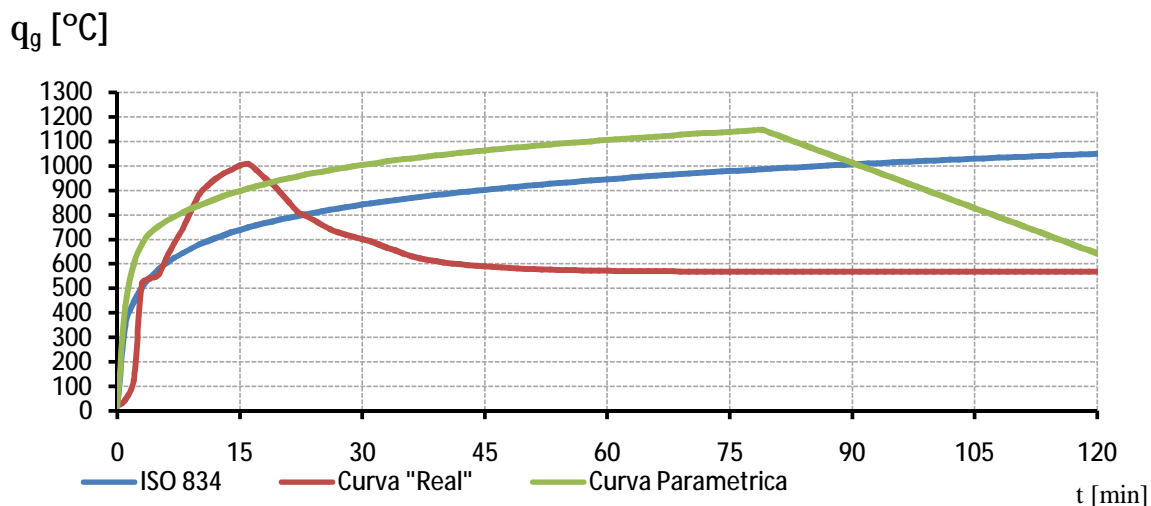


Gráfico 8.10 – Comparação das curvas ISO 834, paramétrica e real segundo o modelo 5.

Neste gráfico é possível verificar que a curva paramétrica que descreve as condições do modelo de aberturas 5 atinge temperaturas mais severas do que a curva de incêndio padrão, como foi notório em todos os modelos de cálculo. Para as mesmas condições impostas ao modelo de simulação computacional, é notória a sua diferença nos primeiros instantes, sendo a curva correspondente menos severa que as restantes curvas.

9. Conclusões e desenvolvimentos futuros

O trabalho desenvolvido insere-se no domínio do comportamentos e resistência dos materiais de construção quando sujeitos ao fogo, através de uma avaliação das condições de temperatura a que os materiais de estão sujeitos em situação de incêndio.

Neste trabalho pretendeu-se analisar a capacidade de resposta da curva de incêndio padrão em situação de incêndio. Foi tomada esta opção pelo facto de se tratar da curva de referência em todo o espaço económico europeu para descrição do comportamento ao fogo dos materiais e elementos de construção.

Contudo, pelo facto da curva de incêndio padrão, como o seu nome indica, se tratar de uma curva padronizada sempre com o mesmo andamento, servindo assim para analisar todo o tipo de materiais em todo o tipo de condições, foi considerado de interesse comparar a curva de incêndio padrão com curva paramétricas que melhor descrevam uma situação real, sendo estas curvas propostas pelo Eurocódigo 1.

Para tal, foram simulados cinco modelos de uma habitação unifamiliar com uma densidade de carga de incêndio ligeiramente abaixo do normal recomendado como valor médio para habitação pelo Eurocódigo 1, tendo sido introduzidas variações tanto na área dos compartimentos como na ventilação existente em todos os modelos.

Foi notório que, em todos os casos simulados, a curva paramétrica que descrevia as características de cada compartimento tomou sempre temperaturas mais severas ao longo da fase de aquecimento do que a curva de incêndio padrão, não sendo contudo possível afirmar que este comportamento se mantém para todas as situações, pois para situações onde a densidade de carga térmica no compartimento é baixa, a curva paramétrica que descreve esse desenvolvimento não segue a mesma tendência, tomando temperaturas muito menos severas do que a curva de incêndio padrão.

Surgiu então a necessidade de comparar os dados obtidos pela curva de incêndio padrão com a curva paramétrica e com um incêndio “real” caracterizado pelas condições que descreviam cada modelo e consequentemente cada curva paramétrica. Para tal, foram analisados por simulação computacional os modelos descritos em cada curva paramétrica e obtido o desenvolvimento da temperatura dos gases em cada modelo.

Feita a comparação de todos os dados de estudo para cada modelo, verifica-se que, em algumas situações, o incêndio real atinge temperaturas em muito superiores às atingidas pela curva paramétrica correspondente, nomeadamente em situações de maior ventilação. Contudo, existem situações de baixa ventilação, onde o incêndio real atinge temperaturas inferiores às da própria curva de incêndio padrão.

A realização deste trabalho mostra que o fenómeno do fogo no interior de um compartimento, mesmo envolvendo o recurso a modelos de simulação computacional, é de tal forma complexo e controlado por um leque tão diverso de condicionantes e de variáveis, que se torna impraticável analisar um problema concreto, considerando todas as combinações possíveis. Esta situação leva a que a análise de um compartimento seja efectuada segundo as curvas paramétricas, as quais, embora se tenha demonstrado que em certas situações exibem limitações, são geralmente mais plausíveis e mais conservativas do que a curva de incêndio padrão.

Contudo, a utilização de curvas paramétricas para descrição de uma situação de incêndio num compartimento não deve ser tida como substituta incondicional da curva de incêndio padrão. É certo que o facto de serem geralmente curvas mais conservativas, pode propiciar uma melhoria nas condições de segurança contra incêndio. Mas deve ser também tido em conta o facto de um incêndio se tratar de uma situação accidental com uma baixa probabilidade de ocorrência. Não deve pois ser subestimada a curva de incêndio padrão para a análise de comportamento dos materiais ao fogo, pois caso contrário pode-se ser levado a projectar edifícios para uma temperatura de incêndio à qual o edifício pode nunca vir a estar sujeito ao longo da sua vida útil, encarecendo em muito os custos da sua construção.

Este trabalho pode servir de base para o desenvolvimento de trabalhos futuros no âmbito da segurança contra incêndio em edifícios, nomeadamente nos seguintes tópicos;

- Análise e validação de métodos para previsão da evolução da temperatura no interior dos edifícios;
- Estudo dos mecanismos de propagação de gases a altas temperaturas no interior dos edifícios;
- Comportamentos e reacção ao fogo dos materiais e elementos de construção.

10. Bibliografia

- [1] REAL, PAULO VILA; “*Incêndio em estruturas metálicas – Cálculo estrutura*”; Edições Orion, Novembro de 2003.
- [2] NP EN 1991-1-2:2010; “*Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-2: Acções gerais – Acções em estruturas expostas ao fogo*”, Março de 2009.
- [3] NP EN 1992-1-2:2010; “*Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão – Parte 1-2: Regras gerais – Verificação de resistência ao fogo*”, Julho de 2008.
- [4] NP EN 1993-1-2:2010; “*Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-2: Regras gerais – Verificação de resistência ao fogo*”, Março de 2009.
- [5] FRANSSEN, JEAN-MARC; REAL, PAULO VILA – “*Fire design of steel structures*”; 1ª Edição, Ernst & Sohn ,2010.
- [6] COELHO, ANTÓNIO LEÇA; “*Segurança contra incêndio em edifícios de habitação*”; Edições Orion, Novembro de 1998.
- [7] JACKSON, L.; “*Guide of building fire protection*”; FPA, 1997.
- [8] CASTRO, CARLOS FERREIRA. DE; ABRANTES, JOSÉ BARREIRA; “*Manual de segurança contra incêndio em edifícios – Escola nacional de bombeiros*”; Sintra, Setembro de 2004.
- [9] SANTOS, CARLOS A. PINA DOS; “*A classificação europeia de reacção ao fogo dos produtos de construção*”; ITE 55; LNEC; 1ª Edição, 2009
- [10] DECRETO-LEI Nº. 220/2008 – *Regime jurídico de segurança contra incêndios em edifícios*.
- [11] PORTARIA Nº. 1532/2008 – *Regulamento técnico de segurança contra incêndio em edifícios*.
- [12] DESPACHO Nº. 2074/2009 – *Critérios técnicos para determinação da densidade de carga de incêndio modificada*.
- [13] FERREIRA, JOSÉ PEDRO SIMPLICIO; “*Capacidade resistente de secções de betão armado sujeitas a incêndios*”; Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas; IST; Abril de 1989.
- [14] VIEGAS, JOÃO CARLOS GODINHO; “*Segurança contra incêndios em edifício – modelação matemática de incêndios e validação experimental*”; Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica; IST; 1999; Publicação LNEC 2005.
- [15] EN 13501-1:2007+A1:2009; “*Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using data from reaction to fired tests*”.

-
- [16] EN 13501-2:2007+A1:2009; “*Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services*”.
- [17] ISO 834-1:1999; “*Fire – Resistance tests – Elements of buildings construction – Part 1: General requirements*”.
- [18] ISO/TR 834-2:2009; “*Fire – Resistance tests – Elements of buildings construction – Part 2: ”Guidance on measuring uniformity of furnace exposure on test samples*”.
- [19] ISO/TR 834-3:1994; “*Fire – Resistance tests – Elements of buildings construction – Part 3: Commentary on test method and test data application*”.
- [20] WALTON, W. DOUGLAS; “*SFPE – Handbook of Fire Protection Engineering – Section 3*”; NIST; 3rd Edition, 2002.